

Titre: Ajout de fusibles aux diagonales de contreventements pour la
Title: conception sismique de charpentes métalliques à un étage

Auteur: Daniel Kassis
Author:

Date: 2008

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Kassis, D. (2008). Ajout de fusibles aux diagonales de contreventements pour la
Citation: conception sismique de charpentes métalliques à un étage [Mémoire de maîtrise,
École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/8260/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8260/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Robert Tremblay
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

AJOUT DE FUSIBLES AUX DIAGONALES DE
CONTREVENTEMENTS POUR LA CONCEPTION
SISMIQUE DE CHARPENTES MÉTALLIQUES À UN ÉTAGE

DANIEL KASSIS
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)

HIVER 2008



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-41565-8

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-41565-8

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

AJOUT DE FUSIBLES AUX DIAGONALES DE
CONTREVENTEMENTS POUR LA CONCEPTION SISMIQUE
DE CHARPENTES MÉTALLIQUES À UN ÉTAGE

présenté par : KASSIS, Daniel

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Mme KOBOEVIC, Sanda , Ph.D., présidente

M. TREMBLAY, Robert, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. LÉGER, Pierre, Ph.D., membre du jury

À la mémoire
de mon grand-père (1922-2007)
et
de ma grand-mère (1918-2007)

REMERCIEMENTS

Je tiens, tout d'abord, à remercier mon directeur de recherche, monsieur le professeur Robert Tremblay pour ces trois années de maîtrise. Au cours de ces années, sa grande disponibilité, sa rigueur scientifique, son enthousiasme et ses précieux conseils m'ont permis de travailler dans les meilleures conditions. La confiance qu'il m'a accordée ainsi que nos nombreuses discussions m'ont permis de progresser et de mieux appréhender les différentes facettes du métier d'ingénieur en structure.

Je voudrais adresser un remerciement particulier à monsieur Martin Lachappelle (président chez Lainco) et à monsieur Eric Lachappelle (vice-président chez Lainco) pour leur contribution à mon projet, autant pour la fourniture des spécimens d'acier, que pour les précieux conseils et pour leur intérêt pour ce projet.

Je tiens également à remercier tous les membres du laboratoire, à leur enthousiasme, qui contribuent à une ambiance de travail agréable et propice à la recherche. Je pense particulièrement à Thibault Larroque et Charles-Édouard Olivetti pour leur aide dans les essais dans le cadre et à la prise de mesures sur les spécimens de fusibles, et à David Ek pour les essais sur les fusibles. Je tiens aussi à remercier Viacheslav Koval, Patrice Bélanger, Denis Fortier et Yves Miséréré pour leur aide au bon déroulement des essais.

Je remercie aussi les membres du jury pour la lecture de mon mémoire et de l'intérêt qu'ils portent à mon travail.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à mes parents, à mon frère et à tous mes proches pour leur soutien constant et leur patience.

RÉSUMÉ

Lors de la conception sismique des contreventements en « X » travaillant en tension-compression à ductilité modérée et limitée, il a été remarqué que les structures sont à même de résister à des charges beaucoup plus élevées que les charges de conception, à un point que les constructions suivant les prescriptions de la construction conventionnelle ($R = 1.5$) sont économiquement plus attrayantes.

L'excédant de résistance découle de la méthode de conception nommée conception par capacité « Capacity Design ». Dans le cas d'un contreventement en acier avec des diagonales travaillant en tension-compression, la sélection de la diagonale est gouvernée par sa résistance en compression qui est inférieure à sa résistance en tension. Une fois les diagonales choisies, les composantes structurales adjacentes doivent être augmentée au niveau correspondant à la résistance réelle des diagonales. Ainsi, dans plusieurs cas, les composantes structurales adjacentes se voient dimensionnées pour une charge excédant par deux (2) fois la charge de sollicitation sismique.

Dans la pratique, les ingénieurs en structure sont au fait de l'excédant de résistance. Certains d'entre eux ont proposé de réduire localement la section de la diagonale de manière à ce que l'aire réduite développe la résistance en traction nécessaire pour éviter d'amplifier outre mesure la force transmise aux composantes structurales adjacentes.

L'objectif principal de ce projet est de présenter une géométrie de fusible qui permet de réduire la résistance en traction des diagonales, sans toutefois altérer leur résistance en compression.

Pour y parvenir, nous devons d'abord établir la recevabilité du fusible. Nous devons valider si l'ajout des fusibles peut en effet engendrer des économies. Ainsi, nous avons

procédé à une étude paramétrique qui avait pour objectif d'indiquer les situations (géométries de bâtiments, longueurs des diagonales, etc.) et les profilés les plus propices à l'utilisation de fusibles. De plus, cette étude servait de tremplin aux essais expérimentaux, puisqu'elle indique les situations à recréer au laboratoire. De cette étude paramétrique, nous avons pu vérifier que l'ajout de fusibles pouvait s'avérer une option économique dans le cas de contreventements travaillant en tension-compression.

Nous avons ensuite entrepris un 1^{er} programme expérimental, pour lequel nous avons étudié le comportement du fusible envisagé avant qu'il ne soit ajouté à la diagonale. Les résultats obtenus de ce programme expérimental favorisaient la suite des essais au niveau d'ajouter les fusibles aux diagonales.

Nous avons complété notre investigation par un 2^e programme expérimental dans lequel nous avons appliqué le fusible envisagé à la diagonale. Nous avons soumis ces spécimens à des chargements cycliques statiques et dynamiques. Nous avons aussi, durant ce programme, procéder à des essais sur des fusibles qui sont présentement utilisés dans la pratique (ouvertures circulaires, ovalisées et multiples). Les résultats de ces essais confirment une concentration de contraintes au droit des ouvertures, entraînant des ruptures prématurées. Alternativement, nous proposons d'utiliser des fusibles formés par l'arrangement de quatre cornières. Suivant nos recherches, nous pensons que l'utilisation de ces fusibles s'intègre bien à la philosophie de la conception par capacité. Leur utilisation permettra de produire des économies lors de la conception de contreventements travaillant en tension-compression, favorisant majoritairement les bâtiments de grande superficie et à faible hauteur.

ABSTRACT

When carrying out the seismic design of tension-compression “X” bracings of moderate and limited ductility, it was noticed that the structures are capable to resist higher loads than required, up to a point that the rules for conventional constructions are economically more attractive.

The excess of resistance is due to the philosophy of “Capacity Design”. In the case of tension-compression steel bracing, the braces are governed by their resistance in compression which is lower than their tension resistance. Once a brace is chosen, the design loading of all adjacent structural components must be increased to the level corresponding to the real strength of the braces. In several cases, the adjacent structural components are sized for a load exceeding by a factor of two (2) the code design seismic load.

In practice, structural engineers are aware of this excess of resistance. Some have proposed to locally reduce the section of the brace, so that its reduced area develops only the necessary resistance in tension. This solution aims at avoiding the increase size of the adjacent structural components.

The main goal of this project is to propose a fuse design that reduces the tension resistance of the brace without affecting its compressive resistance.

Following that purpose, we first need to establish the appropriateness of the fuse concept. In other words, we first had to establish if the addition of fuses can indeed generate economies. In order to verify its admissibility, we performed a parametric study which was aimed at indicating situations (geometries of buildings, lengths of the braces, etc) and the most favorable steel sections for the utilization of fuses. Moreover, the results from this study were used to drive the experimental programs, since it indicated the situations to be recreated at the laboratory. Moreover, the results of the parametric

study indicated that the addition of fuses could be an economical option in the case of tension-compression bracings.

We then undertook a first experimental program, for which we studied the behavior of the fuse only, before it is added to the brace. The results obtained from this experimental program supported the continuation of the tests by adding the fuses to the diagonals.

We supplemented our investigation by a second experimental program in which we implemented the fuse design under consideration with the brace. We subjected these tests to static and dynamic cyclic loadings. In addition to testing the proposed fuse system, we also proceeded to tests on fuse design that are currently used in practice (circular, ovalized and multiple holes in tube braces). The results from these tests confirmed a stress concentration at the root of the holes, leading to premature rupture. Alternatively, we propose to use fuses formed by the arrangement of four angles. According to our research, we think that the use of these angle fuses may be well integrated into the philosophy of the capacity design. Their use will produce economies when designing tension-compression bracings, mainly for large surface and low rise buildings.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	v
Résumé	vi
Abstract	viii
Table des matières	x
Liste des tableaux	xiv
Liste des figures	xv
Liste des annexes	xx
Chapitre 1 – Introduction	1
1.1 Problématique	1
1.2 Objectifs	4
1.3 Méthodologie et organisation de la thèse	5
Chapitre 2 – Revue de littérature	7
2.1 CNBC 2005	7
2.1.1 Localisation	7
2.1.2 Données climatiques	9
2.1.3 Catégories des systèmes de résistance aux forces sismiques	16
2.1.4 Période fondamentale	18
2.2 Norme S16-01	20
2.2.1 Généralités	20
2.3 Concept du fusible	24
2.4 Combinaisons de charges	26
Chapitre 3 – Étude paramétrique	28
3.1 Introduction	28

3.2	Objectif.....	28
3.3	Hypothèses de conception et paramètres	29
3.3.1	Normes et code de conception	29
3.3.2	Localisation.....	29
3.3.3	Charges.....	29
3.3.4	Paramètres de combinaison géométriques.....	31
3.4	Analyse statique équivalente.....	34
3.5	Distribution de la charge sismique.....	41
3.6	Sélection des profilés	42
3.7	Conception des fusibles	42
3.8	Résultats	43
3.8.1	Potentiel d'économie aux assemblages et aux poteaux.....	43
3.8.2	Potentiel d'économie au diaphragme de toit	54
3.9	Profilés les plus récurrents	63
3.10	Discussions.....	66
Chapitre 4 – Programme Expérimental 1 – Cornières		68
4.1	Introduction	68
4.2	Objectifs	68
4.3	Choix (justification) et conception des spécimens	69
4.4	Description des cornières.....	74
4.4.1	Zone de transition.....	76
4.5	Description des essais	81
4.6	Liste des essais.....	83
4.6.1	Éprouvette d'acier.....	83
4.6.2	Cornières.....	85
4.7	Montage des spécimens	87
4.8	Assemblages	89
4.8.1	Cornière au profilé tubulaire.....	89
4.8.2	Profilé tubulaire aux plaques.....	90

4.9	Procédure d'essais.....	92
4.9.1	Préparation des spécimens	92
4.10	Résultats.....	96
4.10.1	Fusibles formés à partir de L51x51x6.4.....	96
4.10.2	Autres spécimens.....	102
4.10.3	Description spécifique de chacun des essais	107
4.11	Discussions.....	131
4.12	Conclusion du programme expérimental 1	132
Chapitre 5 – Programme expérimental 2 – Cadre d'essai.....		134
5.1	Objectifs.....	134
5.2	Choix (justifications) et conception des spécimens.....	135
5.2.1	Cadre d'essai.....	135
5.2.2	Poutre.....	137
5.2.3	Colonnes	138
5.2.4	Diagonales	139
5.3	Protocole de chargement	155
5.4	Montage.....	159
5.4.1	Cadre d'essai.....	159
5.4.2	Essais préliminaires.....	161
5.4.3	Instrumentations	164
5.4.4	Préparation des spécimens	167
5.5	Résultats.....	168
5.5.1	Observations générales.....	168
5.5.2	Observations particulières sur chacun des essais.....	169
5.6	Synthèses des résultats	211
5.7	Discussions.....	219
Chapitre 6 – Sommaire et Conclusions		221
Bibliographie		225

Annexes	227
---------------	-----

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Données climatiques et sismiques.....	10
Tableau 2-2 : Définition du spectre de calcul.....	13
Tableau 2-3 : Valeurs F_a en fonction du type de sol et de $S_a(0.2)$	15
Tableau 2-4 : Valeurs F_v en fonction du type de sol et de $S_a(1.0)$	16
Tableau 2-5 : Système de résistance aux forces sismiques pour les charpentes métalliques.....	18
Tableau 3-1 : Composition et évaluation de la charge permanente de la toiture.....	30
Tableau 3-2 : Superficie des bâtiments	31
Tableau 3-3 : Rapports des longueurs des murs	32
Tableau 3-4 : Hauteur des bâtiments.....	33
Tableau 3-5 : Charge de neige	35
Tableau 3-6 : Résumé des paramètres considérés	36
Tableau 3-7 : Efforts dans les contreventements induits par la torsion	38
Tableau 3-8 : Efforts dans les contreventements induits par la torsion	39
Tableau 3-9 : Récurrence des profilés.....	64
Tableau 4-1 : Résultats obtenus de l'étude paramétrique pour la conception des cornières	74
Tableau 4-2 : Rayons modélisés	77
Tableau 4-3 : Description des essais.....	86
Tableau 4-4 : Numérotation des spécimens	96
Tableau 4-5 : Spécimens proposés par Lainco.....	102
Tableau 5-1 : Résumé de données pour les diagonales.....	170
Tableau 5-2 : Résumé et numérotation des essais.....	212
Tableau 5-3 : Synthèse des valeurs expérimentales	213

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Contreventements en X (Tremblay 2005).....	3
Figure 1-2 : Bâtiment industriel (Tremblay 2005).....	3
Figure 1-3 : Fusible à ouvertures circulaires (Tremblay 2005)	4
Figure 1-4 : Fusible à ouvertures ovalisées	4
Figure 2-1 : Tremblements de terre au Canada	8
Figure 2-2 : Distribution approximative du risque sismique	9
Figure 2-3 : Spectre de calculs pour les villes de Montréal et Vancouver	14
Figure 2-4 : Sur-résistance, ϕ en fonction de ϕ	25
Figure 3-1 : Torsion accidentelle	40
Figure 3-2: Tension-compression.....	41
Figure 3-3: Tension seulement.....	41
Figure 3-4 : % d'économie en raison de l'ajout du fusible.....	48
Figure 3-5 : Rapport des forces de tractions (T_u) pour les contreventements type MD	50
Figure 3-6 : Rapport des forces de tractions (T_u) pour les contreventements type LD	51
Figure 3-7 : Rapport des forces de tractions (T_u) pour les contreventements type TC.....	53
Figure 3-8 : Rapport des forces de tractions (T_u) pour les contreventements type TC.....	54
Figure 3-9 : Réduction de l'effort tranchant du toit	57
Figure 3-10 : Rapport des efforts tranchants au toit (V_u) pour les contreventements type MD.....	59
Figure 3-11: Rapport des efforts tranchants au toit (V_u) pour les contreventements type LD.....	60
Figure 3-12 : Rapport des efforts tranchants au toit (V_u) pour les contreventements type TC	62
Figure 3-13 : Rapport des efforts tranchants au toit (V_u) pour les contreventements type TC	63
Figure 3-14 : Distribution des résultats en fonction du rapport d'élancement (KL/r).....	65
Figure 4-1 : Géométrie du fusible envisagé	70
Figure 4-2 : Fusible envisagé	71
Figure 4-3 : Géométrie des cornières.....	75
Figure 4-4 : Coupe A	75
Figure 4-5 : Vue générale du modèle.....	77
Figure 4-6 : Modèle I: rayon de 80mm	78
Figure 4-7 : Modèle II: rayon de 96mm	78
Figure 4-8 : Modèle III: rayon de 40 mm	79
Figure 4-9 : Modèle IV: rayon de 60mm.....	80

Figure 4-10 : Modèle IV: rayon de 70mm.....	81
Figure 4-11 : Éprouvette d'acier selon la norme ASTM-E8.....	84
Figure 4-12 : Montage d'essai	87
Figure 4-13 : Coupe A	88
Figure 4-14 : Coupe B	88
Figure 4-15 : Position des jauges.....	93
Figure 4-16 : Potentiomètre à corde.....	95
Figure 4-17 : P/Py en fonction de la déformation pour tous les spécimens.....	97
Figure 4-18 : P/Py en fonction de la déformation pour les spécimens 1 à 6.....	98
Figure 4-19 : P/Py en fonction de la déformation pour les spécimens 7 et 8.....	99
Figure 4-20 : P/Py en fonction de la déformation pour les spécimens usinés	100
Figure 4-21 : P/Py en fonction de la déformation pour les spécimens ASTM-E8.....	101
Figure 4-22 : P/Py en fonction de la déformation pour les spécimens.....	103
Figure 4-23 : P/Py en fonction de la déformation pour les spécimens F1-A,.....	104
Figure 4-24 : P/Py en fonction de la déformation pour les spécimens F2-A,.....	105
Figure 4-25 : P/Py en fonction de la déformation pour les spécimens F13-A,.....	106
Figure 4-26 : Spécimen 1-1A – Déformation en fonction du temps pour les jauges supérieures.....	108
Figure 4-27 : Spécimen 1-1A – Déformation en fonction du temps pour les jauges centrales.....	108
Figure 4-28 : Spécimen 1-1A – Déformation en fonction du temps pour les jauges inférieures	109
Figure 4-29 : Spécimen 1-1A	110
Figure 4-30 : Spécimen 1-1A	110
Figure 4-31 : Spécimen 2-3A – Déformation en fonction du temps pour les jauges supérieures.....	111
Figure 4-32 : Spécimen 2-3A – Aire de la section en fonction des lignes tracées.....	112
Figure 4-33 : Spécimen 2-3A après l'essai	114
Figure 4-34 : Spécimen 3-2A après l'essai	116
Figure 4-35 : Spécimen 3-2A – Déformation en fonction du temps pour les jauges supérieures.....	117
Figure 4-36 : Spécimen 3-2A – Déformation en fonction du temps pour les jauges centrales.....	118
Figure 4-37 : Spécimen 3-2A – Déformation en fonction du temps pour les jauges inférieures	119
Figure 4-38 : Spécimen 3-2A – Aire de la section en fonction des lignes tracées.....	120
Figure 4-39 : Spécimen 4-1B – Déformation en fonction du temps pour les jauges supérieures.....	122
Figure 4-40 : Spécimen 4-1B – Déformation en fonction du temps pour les jauges centrales.....	123
Figure 4-41 : Spécimen 4-1B – Déformation en fonction du temps pour les jauges inférieures	124
Figure 4-42 : Spécimen 4-1B – Aire de la section en fonction des lignes tracées.....	125

Figure 4-43 : Spécimen 5-2B – Déformation en fonction du temps pour les jauges supérieures	126
Figure 4-44 : Spécimen 5-2B – Aire de la section en fonction des lignes tracées.....	127
Figure 4-45 : Spécimen 6-3B – Déformation en fonction du temps pour les jauges supérieures	128
Figure 4-46 : Spécimen 6-3B – Aire de la section en fonction des lignes tracées.....	129
Figure 4-47 : Spécimen 6-3B après la rupture	130
Figure 5-1 : Représentation des diagonales utilisées pour les essais	136
Figure 5-2 : Cadre d'essai	136
Figure 5-3 : Colonnes du cadre.....	138
Figure 5-4 : Fusible formé d'ouvertures circulaires sur chaque face	142
Figure 5-5 : Fusible formé d'une ouverture ovalisée sur chaque face	143
Figure 5-6 : Fusible formé de plusieurs ouvertures sur chaque face.....	145
Figure 5-7 : Fusibles formés de quatre cornières	146
Figure 5-8 : Fusible suivant la conception 1	149
Figure 5-9 : Détail 1 pour la conception 1	149
Figure 5-10 : Coupe A pour la conception 1	150
Figure 5-11 : Détail 1 pour la conception 2	151
Figure 5-12 : Diagonale suivant la conception 3.....	152
Figure 5-13 : Détail 1 pour la conception 3	153
Figure 5-14 : Diagonale formé d'un HSS127x4.8	154
Figure 5-15 : Détail 1 pour le HSS127	155
Figure 5-16 : Coupe A pour le profilé HSS127.....	155
Figure 5-17 : Protocole de chargement cyclique CT.....	156
Figure 5-18 : Protocole de chargement cyclique CC	157
Figure 5-19 : Protocole de chargement dynamique (DYN).....	158
Figure 5-20 : Cadre d'essai	159
Figure 5-21 : Cadre d'essai	160
Figure 5-22 : Assemblage poutre-diagonale.....	161
Figure 5-23 : Essais sur la cadre à vide	162
Figure 5-24 : Potentiomètre à corde installé sur le gousset.....	165
Figure 5-25 : Potentiomètres à corde sur fusible	166
Figure 5-26 : Potentiomètre verticale	167
Figure 5-27 : 1CT – P/P_y en fonction de δ/δ_y	172

Figure 5-28 : Élancement de la diagonale sans fusible	174
Figure 5-29 : Voilement local de la diagonale à mi-longueur.....	175
Figure 5-30 : Début du déchirement à la suite du voilement local	176
Figure 5-31 : Rupture de la diagonale.....	177
Figure 5-32 : 3CT – P/P_y en fonction de δ/δ_y	178
Figure 5-33 : 2CT – P/P_y en fonction de δ/δ_y	179
Figure 5-34 : Rupture du spécimen 2CT	180
Figure 5-35 : Rupture du spécimen 2CT	181
Figure 5-36 : 4CT – P/P_y en fonction de δ/δ_y	182
Figure 5-37 : Spécimen 4CT	183
Figure 5-38 : Rupture du spécimen 4CT	184
Figure 5-39 : 4DYN – P/P_y en fonction de δ/δ_y	185
Figure 5-40 : 5CT – P/P_y en fonction de δ/δ_y	187
Figure 5-41 : Mesures sur la cornière à la position Est/Bas	188
Figure 5-42 : Mesures sur la cornière à la position Est/Haut	189
Figure 5-43 : Mesures sur la cornière à la position Ouest/Haut.....	189
Figure 5-44 : Mesures sur la cornière à la position Est/Bas	189
Figure 5-45 : 5CT_2 – P/P_y en fonction de δ/δ_y	191
Figure 5-46 : 5CC – P/P_y en fonction de δ/δ_y	193
Figure 5-47 : Flambement du spécimen 5CC sous une charge de compression.....	195
Figure 5-48 : 5DYN - P/P_y en fonction de δ/δ_y	196
Figure 5-49 : 6CT – P/P_y en fonction de δ/δ_y	198
Figure 5-50 : 6CC – P/P_y en fonction de δ/δ_y	200
Figure 5-51 : Voilement local à mi-longueur de la diagonale.....	201
Figure 5-52 : Voilement local à mi-longueur de la diagonale.....	202
Figure 5-53 : Flambement local de la diagonale	202
Figure 5-54 : 7CT – P/P_y en fonction de δ/δ_y	204
Figure 5-55 : 7CC – P/P_y en fonction de δ/δ_y	205

Figure 5-56 : 8CT – P/P_y en fonction de δ/δ_y	207
Figure 5-57 : Flambement local du spécimen 8CT à mi-longueur de la diagonale	208
Figure 5-58 : Début du déchirement des parois	209
Figure 5-59 : Flambement de la diagonale	209
Figure 5-60 : Rupture du spécimen 8CT à mi-portée.....	210
Figure 5-61 : Rupture du spécimen 8CT. Agrandissement de la zone de rupture	211
Figure 5-62 : Point de rupture des spécimens soumis au protocole de chargement CT	215
Figure 5-63 : Point de rupture des spécimens soumis au protocole de chargement CC	216
Figure 5-64 : Déplacement vertical en fonction de la charge pour protocole CT.....	217
Figure 5-65 : Déplacement vertical en fonction de la charge pour protocole CC	218

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Programme expérimental no.1 - Aires des sections	227
Annexe B : Programme experimental no.2 – Mesures.....	235

CHAPITRE 1 – INTRODUCTION

1.1 Problématique

Le Code National du bâtiment du Canada (CNBC 2005) et la norme S16-01 (CSA 2001) sont des documents de références essentiels lors de la conception de charpentes d'acier. Le CNBC indique aux ingénieurs les méthodes à suivre pour déterminer les charges de sollicitations auxquelles la charpente doit résister (charges vives, charge de vent, charge de séisme, etc.), et la norme S16-01 décrit les méthodes à suivre pour déterminer la résistance des membrures formant la charpente.

Lors de la conception sismique des contreventements en « X » travaillant en traction-compression à ductilité modérée ou à ductilité limitée, il a été remarqué que les structures sont à même de résister à des charges beaucoup plus élevées que les charges de sollicitations, à un point que les constructions suivant les prescriptions de la construction conventionnelle ($R=1.5$) sont économiquement plus attrayantes. Il est évident qu'un ingénieur, soucieux de présenter une conception économique, a tout avantage de développer une charpente dont la résistance sera le plus près possible des charges de sollicitation, et ce en adoptant les prescriptions de la construction conventionnelle, ou en proposant des profilés répondant indirectement aux prescriptions des contreventements à ductilité modérée et limitée.

L'excédant de résistance découle de la conception par capacité. Lors de la conception d'une charpente en acier avec contreventement en « X » dans une région à fortes activités sismiques, l'ingénieur doit définir les charges sismiques auxquelles la charpente sera soumise et ce, en suivant les indications du CNBC2005. Par la suite, il procède à la sélection des membrures formant les diagonales de contreventement de manière à résister aux charges de sollicitations. Dans le cas d'un contreventement en

acier avec des diagonales travaillant en traction-compression, la sélection de la diagonale est gouvernée par sa résistance en compression qui, en raison du facteur d'élancement, est inférieure à sa résistance en traction. Une fois les diagonales choisies, la norme S16-01 requiert que les charges transmises aux composantes structurales adjacentes (assemblages, tablier de toit, poutres, colonnes, fondations, etc.) soient augmentées au niveau correspondant à la résistance réelle des diagonales. Cette méthode de conception, nommée conception par capacité (« Capacity Design »), assure que les diagonales de contreventement soient les premières composantes à atteindre leur résistance ultime et subir des déformations inélastiques.

Bien que logique que les diagonales soient les premières composantes pouvant être sacrifiées, la conception par capacité induit un excédant de résistance aux composantes structurales adjacentes, et est par le fait même, la problématique que nous tenterons de résoudre dans le cadre de ce projet.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, en raison du facteur d'élancement, la résistance des diagonales en traction est nettement supérieure à la résistance en compression. Il est même fréquent que le ratio de la résistance en traction sur la résistance en compression atteigne des valeurs de 2 ou plus, surtout dans le cas des structures où les diagonales ont des sections plus petites (charges sismiques faibles ou modérées, longues diagonales). Ainsi, dans plusieurs cas, les composantes structurales adjacentes se voient dimensionnées pour une charge de traction excédant par deux (2) fois la charge de sollicitation sismique.

Nous croyons que l'ajout de fusible bénéficiera surtout aux bâtiments industriels et commerciaux (Figure 1-1 et Figure 1-2) ayant pour caractéristiques d'avoir de grandes superficies étendues sur un niveau. Pour ces charpentes, l'élément structural le plus coûteux est le tablier métallique de toit, qui doit couvrir toute la superficie du bâtiment. Ainsi, dans l'éventualité que les charges transmises au toit soient réduites, et que cette

réduction puisse réduire l'épaisseur de la tôle du tablier, il est évident que des économies significatives pourraient être enregistrées.

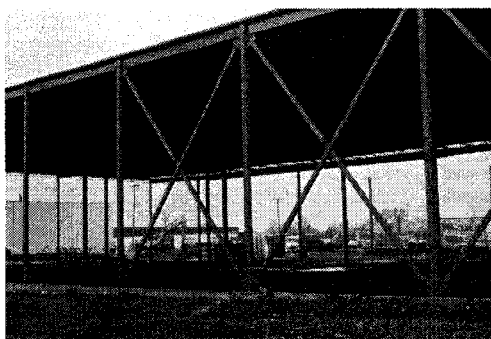


Figure 1-1 : Contreventements en X
(Tremblay 2005)



Figure 1-2 : Bâtiment industriel
(Tremblay 2005)

Dans la pratique, les ingénieurs en structure sont bien au fait de l'excédant de résistance infligée aux composantes structurales adjacentes. Certains d'entre eux ont proposé des solutions en réduisant localement la section de la diagonale de manière à ce que son aire réduite développe la résistance en traction nécessaire pour éviter d'amplifier outre mesure la force transmise aux composantes structurales adjacentes. En réduisant localement l'aire de la section, ces ingénieurs prétendent répondre à toutes les prescriptions de la norme S16, mais doivent, pour y parvenir, sous-entendre que le comportement global de la diagonale en compression n'ait pas été affectée par la section réduite. La solution la plus récurrente est de pratiquer des ouvertures circulaires (Figure 1-3) ou ovalisés (Figure 1-4) sur les parois des tubes rectangulaires formant les diagonales. Cette pratique est toutefois périlleuse en se référant aux recherches antérieures qui démontrent que ces ouvertures produisent une concentration de contraintes au droit des ouvertures et réduisent significativement la résistance des diagonales sous un chargement cyclique.



Figure 1-3 : Fusible à ouvertures circulaires (Tremblay 2005)

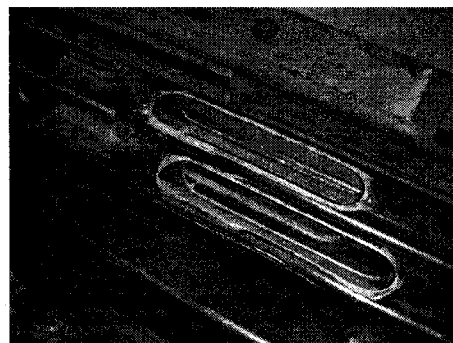


Figure 1-4 : Fusible à ouvertures ovalisées

1.2 Objectifs

L'objectif de ce projet est de proposer et valider géométrie de fusible qui permettra de réduire la résistance en traction des diagonales de manière qu'elle soit équivalente à la résistance en compression. Afin que le fusible soit adopté par la pratique, nous devons nous assurer qu'il soit simple de conception, de construction et d'assemblage, et qu'il soit peu coûteux. Nous ne souhaitons pas que tout le potentiel d'économie soit engloutit par la réalisation du fusible.

Le fusible proposé doit offrir un comportement sismique adéquat, c'est-à-dire subir plusieurs cycles de déformation plastique sans se briser.

Avant de pouvoir nous lancer dans la conception du fusible, nous devons d'abord établir la recevabilité du fusible. Ainsi, nous devons valider si l'ajout des fusibles peut en effet engendrer des économies. Nous devons, dans l'atteinte de cet objectif, établir les situations (profilés, géométrie de bâtiments, localisation) propices à l'ajout de fusibles.

1.3 Méthodologie et organisation de la thèse

Afin de bien couvrir le sujet, quatre étapes seront suivies.

Dans un premier temps, au chapitre 2, nous avons décrit, à la revue de littérature, les prescriptions et restrictions des sections traitant du volet sismique du Code National du Bâtiment 2005 et de la clause 27 de la norme d'acier S16-01.

Le troisième chapitre présentait l'étude paramétrique. Cette étude avait pour objectif de statuer sur la pertinence d'ajouter des fusibles aux contreventements en X à ductilité modérée et ductilité limitée travaillant en traction-compression, et ce, en comparaison aux contreventements utilisés lors de conceptions suivant les recommandations de la construction conventionnelle. Dans l'éventualité où l'ajout de fusible s'avère être un choix plus économique, l'étude paramétrique avait aussi pour objectif d'indiquer les situations (géométrie de bâtiment, longueur des diagonales, etc.) et les profilés les plus propices à l'utilisation de fusibles. Finalement, l'étude paramétrique devait servir de tremplin aux essais expérimentaux, puisqu'elle devait fournir les situations à recréer au laboratoire afin de bénéficier et d'observer les avantages à utiliser des fusibles. L'étude paramétrique est présentée au chapitre 3.

L'étude paramétrique a été concluante, démontrant les avantages du système pour les contreventements en traction-compression. Sur cette base, un premier programme expérimental a été entrepris pour étudier le comportement du fusible, en isolation, avant qu'il ne soit ajouté à la diagonale. À cette étape, nous devons définir la géométrie du fusible et nous assurer que ce dernier soit adéquat. Ces travaux sont décrits au chapitre 4.

Le premier programme expérimental a permis de proposer un modèle de fusible présentant un comportement adéquat. Un deuxième programme expérimental a donc été réalisé sur des fusibles ajoutés aux diagonales. Ces dernières ont été soumises à

un chargement cyclique statique et dynamique dans un cadre d'essai dont la géométrie a été établie suivant les recommandations tirées de l'étude paramétrique. Le second programme expérimental est présenté au chapitre 5.

Le chapitre 6 résume les principales conclusions de l'étude de même que les recommandations en découlant.

CHAPITRE 2 – REVUE DE LITTÉRATURE

Nous présentons dans ce chapitre les règles de conception parasismique du Code National du Bâtiment du Canada 2005 (CNBC 2005) et de la norme CSA S16-01. Nous limiterons, bien évidemment, nos explications aux articles qui seront nécessaires dans le cadre de cette recherche.

2.1 CNBC 2005

Le Code National du Bâtiment du Canada (CNBC) constitue un ouvrage essentiel lors de la conception de bâtiments. La dernière édition, émise en 2005, a subi plusieurs modifications, notamment, quant à son volet sismique.

Plusieurs méthodes sont proposées dans le CNBC afin de déterminer la charge sismique. Nous limiterons ce document à la méthode de la force statique équivalente, car cette méthode est celle qui est habituellement utilisée pour les bâtiments de faible hauteur.

Lors de la réalisation d'un projet, l'ingénieur doit connaître la localisation du bâtiment, son usage et les conditions du sol.

2.1.1 Localisation

La localisation du bâtiment permet à l'ingénieur de statuer des conditions climatiques et sismiques auxquelles le bâtiment devra résister. Le Canada étant un pays ayant une grande superficie, les charges dues aux précipitations de neige et de pluie, aux rafales de vents et aux séismes varient grandement, et la localisation du bâtiment permet à l'ingénieur de statuer des conditions climatiques pour le site du bâtiment.

2.1.1.1 Sélection des villes

Dans le cadre de cette recherche, nous nous sommes concentrés sur la conception de bâtiments dans deux villes canadiennes : Montréal (Québec) et Vancouver (Colombie-Britannique). Ceci est justifié suivant une étude de risque du CNBC, qui conclut que ces villes sont les zones ayant le risque sismique le plus élevé.

Comme le montre la Figure 2-1, les régions ayant d'importantes activités sismiques sont concentrées dans l'ouest canadien, sur les côtes du Pacifique, dans l'est canadien, dans la vallée du Saint-Laurent et de l'Outaouais, et dans le nord canadien.

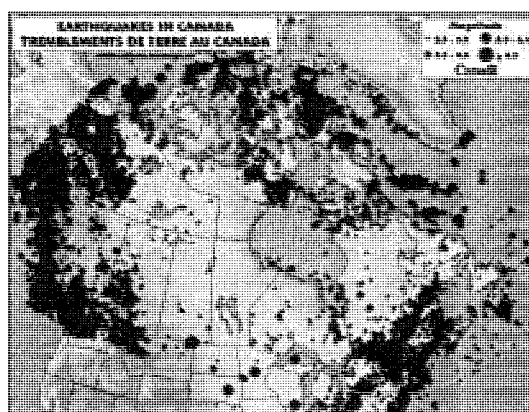


Figure 2-1 : Tremblements de terre au Canada

(<http://seismescanada.rncan.gc.ca/>)

Une distribution du risque sismique est établie en fonction de la population urbaine de chaque ville. Comme le montre la Figure 2-2, les villes de Vancouver et de Montréal présentent le risque sismique le plus élevé au pays.

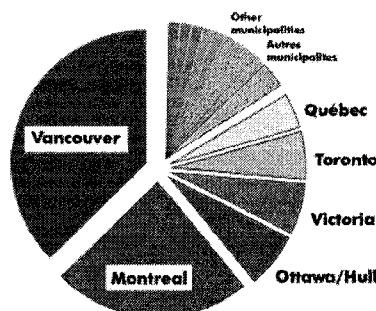


Figure 2-2 : Distribution approximative du risque sismique
en fonction de la population urbaine du Canada - (<http://seismescanada.rncan.gc.ca/>)

Nos motivations à étendre nos recherches aux deux villes plutôt que de nous limiter à la ville ayant le risque sismique le plus élevé se justifient en observant les paramètres sismiques de chacune de ces villes.

L'atténuation des ondes sismiques dans l'est canadien est nettement inférieure à celle de l'ouest canadien. Par exemple, les tremblements de terres de l'est canadien peuvent être ressenties sur plusieurs centaines de kilomètres de l'épicentre (Saguenay 1988 – Ondes sismiques ressentit jusqu'à Washington D.C. à plus de 1000 km) alors que les ondes sismiques de tremblements de terre de l'ouest canadien sont rarement transmises au-delà des 100 km de l'épicentre¹.

2.1.2 Données climatiques

Une fois la localisation du bâtiment définie, l'ingénieur responsable de la conception doit utiliser les paramètres climatiques se rapportant à l'emplacement du bâtiment, et ce, à partir des tableaux mis en annexe au CNBC. Le Tableau 2-1 présente les données climatiques des deux villes d'intérêts pour ce projet.

¹ Source : Prof. Gail Atkinson, Université Carleton

Ville:	Montréal, QC	Vancouver, CB
Précipitation d'un jour 1/50:	96	112 mm
Précipitation annuelle:	830	1325 mm
Indice d'humidité:	0.93	1.44
Précipitations totales:	1025	1400 mm
Charge de neige au sol 1/50		
S _s :	2.6	1.8 kPa
S _r :	0.4	0.2 kPa
Pression de vent horaire, 1/50 :	0.4	0.48 kPa
Données sismiques		
Sa(0.2):	0.69	0.94
Sa(0.5):	0.34	0.64
Sa(1.0):	0.14	0.33
Sa(2.0):	0.0048	0.17
PGA:	0.43	0.46

Tableau 2-1 : Données climatiques et sismiques

Les paramètres présentés au Tableau 2-1 permettront de définir les charges de neige, de vent et de séisme.

2.1.2.1 Charge de neige

Dans le processus de définition des charges sismiques, la définition de la charge de neige constitue une étape préalable puisque, et tel que nous le verrons plus tard, une fraction de la charge de neige doit être considérée dans la définition du poids sismique du bâtiment.

La charge de neige, tel que définie dans le CNBC 2005, se calcule à partir de l'Equation 2-1.

Equation 2-1

$$S = I_s [S_s (C_b C_w C_s C_a) + S_r]$$

Les valeurs de S_s et S_r sont des valeurs climatiques de neige et de pluie (Tableau 2-1).

Le paramètre C_b est le facteur de base de la neige au toit (*basic roof snow load factor*).

Il varie en fonction de la géométrie du toit. Ce facteur est égal à 0.8 pour les petits bâtiments. Pour les bâtiments de plus grandes dimensions, C_b est donné par :

$$C_b = 1 - \left(\frac{30}{\ell_c} \right)^2 \text{ lorsque } \ell_c \geq 70$$

$$C_b = 1.3 - \left(\frac{140}{\ell_c} \right)^2 \text{ lorsque } \ell_c \geq 200$$

où

$$\ell_c = 2w - \frac{w^2}{\ell};$$

w : Longueur du plus petit côté

ℓ : Longueur du plus long côté

Le facteur C_w prend en considération l'exposition au vent. Dans le cadre de ce projet, nous ne considérerons aucune réduction quant à l'exposition du vent. Ainsi, le facteur C_w prend une valeur de 1.0. Le lecteur est invité de se référer à la section 4.1.6.2 4) du CNBC pour plus de détails.

Le facteur C_s varie en fonction de l'inclinaison du toit. Ainsi, pour les toits ayant un angle de 30° ou moins, le paramètre C_s prend la valeur de 1.0. Par contre, le CNBC permet la réduction de ce facteur à mesure que l'inclinaison du toit augmente, et ce,

jusqu'à une inclinaison de 70°. Le facteur C_a prend la valeur de 1.0, sauf si le toit a une forme irrégulière qui pourrait engendrer une accumulation de neige plus importante. Dans le cadre de ce projet, tous les bâtiments sont conçus suivant l'hypothèse d'un toit plat sans irrégularité et ainsi, $C_s = C_a = 1.0$.

Le facteur I_s est dépendant de l'exploitation du bâtiment. Il prend la valeur de 1.0 pour les bâtiments de ce projet.

2.1.2.2 Charge de vent

Dans certaines régions, notamment dans les régions à faible activité sismique, et pour les bâtiments élevés, les charges de vent peuvent gouverner la conception au détriment des charges sismiques. Cependant, dans le cadre de ce projet, nous étudions des bâtiments à un étage situés dans des villes à forte activité sismique. Par conséquent, les charges sismiques gouvernent la conception du système de résistance aux charges latérales.

Pour ces raisons, nous ne nous attarderons pas à définir les charges de vent. Par contre, nous invitons le lecteur intéressé à avoir plus de détail à ce sujet de se référer au CNBC05 qui présente les méthodes de calculs.

2.1.2.3 Aléa sismique

Le CNBC indique, à l'article 4.1.8.11, que la charge statique équivalente est obtenue suivant l'Equation 2-2.

Equation 2-2

$$V = \frac{S(T_a)M_v I_E W}{R_d R_o}$$

Cependant, la valeur V doit être égale ou supérieure aux résultats de l'Équation 2-3

Équation 2-3

$$V \geq \frac{S(2.0)M_v I_E W}{R_d R_o}$$

Dans l'éventualité que le SRFS choisi présente un R_d plus grand que 1.5, il n'est pas nécessaire que la charge sismique excède le résultat de l'Équation 2-4.

Équation 2-4

$$V \leq \frac{2}{3} \frac{S(0.2)I_E W}{R_d R_o}$$

Dans ces équations, S est le spectre de calcul qui correspond à l'intensité maximum des accélérations horizontales de la structure pour une période de retour de 2500 ans.

Le spectre de calcul, Figure 2-3, peut être défini en suivant les indications contenues au Tableau 2-2. La présente le spectre de calcul pour les villes de Montréal et Vancouver, en supposant un sol ferme de type C.

$T(s)$	$S(T)$
≤ 0.2	$F_a S_a(0.2)$
0.5	$\min(F_v S_a(0.5); F_a S_a(0.2))$
1.0	$F_v S_a(1.0)$
2.0	$F_v S_a(2.0)$
≥ 4.0	$F_v S_a(2.0)/2$

Tableau 2-2 : Définition du spectre de calcul

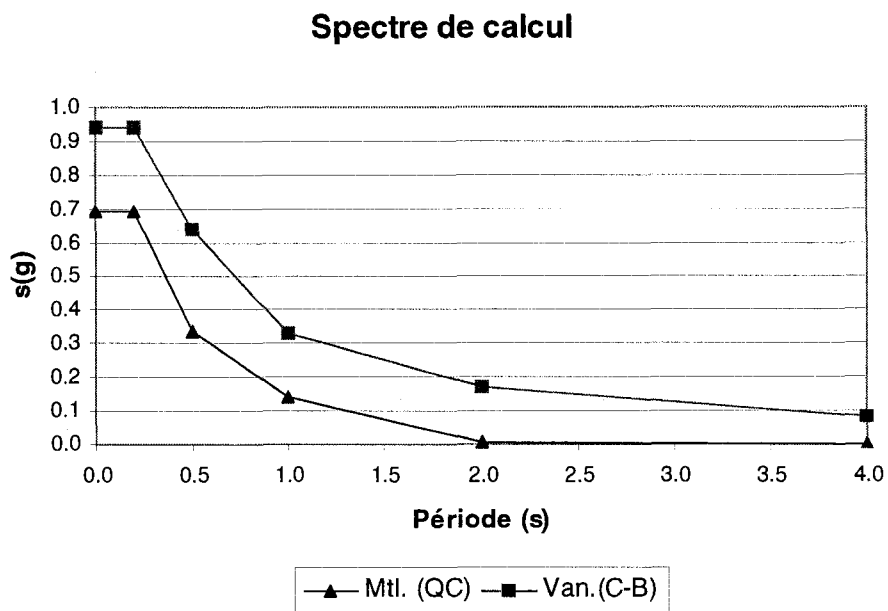


Figure 2-3 : Spectre de calculs pour les villes de Montréal et Vancouver

La qualité du sol sur lequel la structure est érigée affecte sa conception. En plus d'influencer la conception des fondations du bâtiment, la qualité du sol affecte la magnitude de la charge sismique en modifiant le spectre d'accélération.

Le CNBC définit six types de sol. Un sol de type C est un sol très dense, formé de roches tendres, et constitue le sol de référence établi par le CNBC. Les sites de type A et B sont de meilleure qualité qui permettent une réduction des accélérations spectrales pour une période donnée. Contrairement à ces sites, les sols de type D et E sont de moindre qualité, et amplifient l'accélération spectrale. Dans l'éventualité où la qualité du sol soit inconnue ou ne réponde à aucune description fournie par le CNBC, on exige qu'une évaluation locale du site de construction soit entreprise.

2.1.2.4 Coefficients de fondation

Les coefficients de fondation sont des facteurs à considérer lors de l'élaboration du spectre de calcul. À titre de rappel, les spectres présentés à la Figure 2-3 sont ceux de Montréal et Vancouver pour un sol de type C.

Les deux coefficients de fondation définis par le CNBC sont F_a et F_v . Ils représentent, respectivement, des coefficients d'accélération et de vitesse. Ils dépendent du type de sol sur lequel la structure est érigée et des données sismiques incluses dans les données climatiques tabulées en annexe au CNBC.

Les coefficients de fondations sont obtenus à partir du Tableau 2-3 et du Tableau 2-4. L'interpolation linéaire peut être utilisée pour déterminer ces coefficients.

Type de sol	Valeurs F_a				
	$S_a(0.2) \leq$	$S_a(0.2)$	$S_a(0.2)$	$S_a(0.2)$	$S_a(0.2)$
	0.25	= 0.50	= 0.75	=1.00	= 1.25
A	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8
B	0.8	0.8	0.9	1	1
C	1	1	1	1	1
D	1.3	1.2	1.1	1.1	1
E	2.1	1.4	1.1	0.9	0.9
F	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)

Tableau 2-3 : Valeurs F_a en fonction du type de sol et de $S_a(0.2)$

Type de sol	Valeurs F_v				
	$S_a(1.0)$	$S_a(1.0)$	$S_a(1.0)$	$S_a(1.0)$	$S_a(1.0)$
	≤ 0.1	$= 0.2$	$= 0.3$	$= 0.4$	≥ 0.5
A	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6
B	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8
C	1	1	1	1	1
D	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1
E	2.1	2	1.9	1.7	1.7
F	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)

Tableau 2-4 : Valeurs F_v en fonction du type de sol et de $S_a(1.0)$

2.1.3 Catégories des systèmes de résistance aux forces sismiques

Le CNBC propose des règles de calculs pour dix (10) systèmes pour les charpentes métalliques, huit (8) pour les structures de béton, trois (3) pour les structures de bois et cinq (5) pour les structures de maçonnerie.

Ces différents systèmes présentent des niveaux de ductilités différentes pour dissiper l'énergie sismique. Des limites de hauteur de la charpente sont prescrites pour certains systèmes.

Dans le cadre de ce projet, notre intérêt est tourné vers les charpentes métalliques ayant pour système de résistance aux forces sismiques des contreventements concentriques en « X » à ductilité modérée ($R_d = 3.0; R_o = 1.3$) et à ductilité limitée ($R_d = 2.0; R_o = 1.3$).

Le facteur R_d est le facteur de modification de la force qui reflète la capacité de la charpente à dissiper de l'énergie en mode inélastique. Pour sa part, le facteur R_o est le

facteur de sur-résistance.

Le Tableau 2-5 présente tous les systèmes de résistances aux forces sismiques pour les charpentes métalliques. Les facteurs R_d et R_o , de même que les restrictions quant à la hauteur y sont indiqués.

Type de SRFS		R _d R _o		Restrictions				
				Lorsque I _E F _a S _a (0.2)				Lorsque
					≥0.2 to <0.35	≥0.35 to ≤0.75		I _E F _v S _a (1.0) >0.3
					<0.2	<0.35		
Charpentes d'acier contenue à norme CSA S16								
▪	Cadre rigide ductile	5	2	NL	NL	NL	NL	NL
▪	Cadre rigide à ductilité modérée	4	2	NL	NL	NL	NL	NL
▪	Cadre rigide à ductilité limitée	2	1	NL	NL	60	NP	NP
▪	Contreventements concentriques à ductilité modérée:							
	Non-chevron	3	1	NL	NL	40	40	40
	Chevron	3	1	NL	NL	40	40	40
	Tension seulement	3	1	NL	NL	20	20	20
▪	Contreventements concentriques à ductilité limitée:							
	Non-chevron	2	1	NL	NL	60	60	60
	Chevron	2	1	NL	NL	20	20	60

	Tension seulement	2	1	NL	NL	40	40	40
▪	Contreventements excentriques ductiles	4	2	NL	NL	NL	NL	NL
▪	Murs de cisaillement ductiles	5	2	NL	NL	NL	NL	NL
▪	Mur de cisaillement à ductilité modérée	2	2	NL	NL	60	60	60
▪	Construction conventionnelle: cadres rigides, contreventements, ou murs de cisaillement	2	1	NL	NL	15	15	15
▪	Autre SRFS en acier non défini précédemment	1	1	15	15	NP	NP	NP

Tableau 2-5 : Système de résistance aux forces sismiques pour les charpentes métalliques

2.1.4 Période fondamentale

À l'Equation 2-2, le paramètre T_a représente la période fondamentale de la structure. Elle est obtenue en fonction du type de système de résistance aux charges sismique et de la hauteur du bâtiment. Pour une charpente métallique ayant pour SRFS des contreventements en treillis, la période fondamentale est obtenue à partir de l'équation :

Équation 2-5

$$T_a = 0.025h_n$$

Dans l'Équation 2-5, le paramètre h_n est la hauteur totale du bâtiment. Il est important de mentionner que le CNBC permet d'utiliser la période fondamentale obtenue d'une

analyse dynamique modale mais que la période utiliser dans le calcul ne doit pas dépasser par deux fois.

2.1.4.1 Poids du bâtiment

Le paramètre W est le poids sismique du bâtiment, c'est-à-dire le poids des composantes pouvant subir l'accélération produisant les forces sismiques de calcul. Le poids sismique comprend le poids mort, 25% de la charge de neige au toit, 60% du poids entreposé pour des aires d'entreposage et une partie de la charge d'occupation.

2.1.4.2 Facteur des modes supérieurs

Le paramètre M_v est introduit à l'Equation 2-2 et Équation 2-3 pour tenir compte de la contribution des vibrations de la structure au comportement sismique. Cette contribution est faible et peut être négligée pour les bâtiments à faible hauteur. Pour ces structures, on peut donc utiliser $M_v = 1.0$.

Pour les charpentes contreventées construites dans l'ouest canadien, la hauteur de la structure n'affecte pas le facteur des modes supérieurs. Par contre, pour une même charpente construite dans l'est canadien, une attention doit être portée à ce facteur.

Il est aussi important de mentionner que pour une période fondamentale entre 1.0 seconde et 2.0 secondes, une interpolation linéaire du produit de $S(T_a) \cdot M_v$ est exigée.

2.2 Norme S16-01

2.2.1 Généralités

La norme S16-01, renferme toutes les prescriptions et restrictions à vérifier lors de la conception d'une charpente d'acier. La version CSA-S16-01 de la norme et le supplément S16S1-05 sont les références suivies dans ce rapport. Certains articles de la norme ont été modifiés lors de la parution du supplément en janvier 2005, et ce, afin de s'harmoniser avec le CNBC 2005. L'article 27 de la norme S16 contient les dispositions à respecter lors de la conception sismique. Il fait partie du lot d'articles ayant subi des modifications en 2005.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, cette recherche porte sur les systèmes de résistances à charges sismiques constituées de contreventements concentriques en « X » à ductilité modérée et limitée. Par conséquent, nous limiterons nos explications aux articles traitant de ces systèmes.

2.2.1.1 Membrures formant les diagonales

L'article 27.5 de la norme S16 traite des contreventements concentriques à ductilité modérée. Ils sont appelés contreventements de type MD (Moderately Ductile).

Ce SRFS permet les géométries de contreventement en « X » travaillant en traction-compression et en « X » travaillant en traction seulement.

Contreventement à ductilité modérée

Comme tous les autres éléments structuraux, la résistance pondérée des diagonales doit être égale ou excéder les efforts produits des combinaisons de charge sismique du CNB 2005. La sélection préliminaire du profilé peut ainsi être faite à partir des charges de conceptions. Cependant, l'article 27.5.3 présente des conditions supplémentaires que les diagonales doivent respecter.

Tout d'abord, que le contreventement travaille en traction-compression ou en traction seulement, le rapport d'élancement des diagonales (KL/r) ne doit pas excéder 200. De plus, l'article 27.5.3.2 fixe des limitations à l'élancement des parois de la section (rapport b/t) afin d'éviter le voilement local des parois. Pour les profilés tubulaires à section carrée ou rectangulaire, la valeur de b est équivalente à $b - 4t$, où b est la dimension extérieure et t est l'épaisseur. Les limitations sur b/t varient selon l'élancement de la diagonale (KL/r) . Lorsque le rapport d'élancement est inférieur à 100, l'élancement des parois doit être inférieur à $330/\sqrt{F_y}$, i.e. $(b/t \leq 330/\sqrt{F_y})$. Par contre, lorsque le rapport d'élancement est égal à 200, le profilé tubulaire doit être de classe 1, i.e. $(b/t \leq 420/\sqrt{F_y})$. Pour les diagonales de contreventement ayant des rapports d'élancement oscillant entre 100 et 200, l'interpolation linéaire est permise pour déterminer les limitations quant au rapport b/t .

Contreventement à ductilité limitée

Les limitations de b/t sont les mêmes que pour les contreventements à ductilité modérée (art. 27.5.3.2), à l'exception que lorsque $I_E F_a S_a(0.2)$ est inférieur à 0.45, la borne supérieure, c'est-à-dire lorsque l'élancement de la diagonale (KL/r) est égal à 200, est augmentée à $525/\sqrt{F_y}$, i.e. $(b/t \leq 525/\sqrt{F_y})$, soit la limite pour une section de classe 2.

L'article 27.6.3.1 stipule que la limite du rapport d'élancement des contreventements travaillant en traction seulement (T/O) est fixée à 300, pour les bâtiments à 1 ou 2 étages.

Dans ce cas, les limitations quant aux rapports d'élancement des parois (b/t) sont les mêmes que pour les contreventements à ductilité modérée. Cependant, l'article 27.6.3.2 précise que pour un rapport d'élancement (KL/r) excédant 200, aucune limitation quant au rapport d'élancement des parois n'est requise (b/t).

2.2.1.2 Assemblage des diagonales

Comme nous l'indiquions précédemment, une conception par capacité exige d'identifier le chaînon faible dans le système de résistance aux charges latérales (diagonale de contreventement) et de s'assurer que tous les chaînons adjacents soient plus résistants. Par conséquent, afin de s'assurer que la rupture ne se produise pas dans les assemblages des diagonales, ces derniers doivent avoir une plus grande résistance que celle des diagonales elles-mêmes. L'article 27.5.4 de la norme S16 indique les conditions à respecter pour s'assurer que les assemblages soient adéquats.

Traction

L'article 13.2 de la norme S16 indique que la résistance pondérée en traction d'une membrure est donnée par $T_r = \phi A F_y$, où $\phi = 0.9$, A correspond à l'aire de la section brute de la diagonale, et F_y est la limite élastique nominale de l'acier. À l'article 27.5.4.2, on spécifie que les assemblages doivent être conçus de manière à résister à une charge en traction équivalente à la capacité anticipée des diagonales en traction, $T_u = A R_y F_y$. Le facteur R_y est appliqué à F_y afin de refléter la limite élastique probable de l'acier des diagonales (supérieure à la valeur nominale). Il prend la valeur de 1.1. Ce faisant, la résistance des assemblages excède de 22% la résistance pondérée de la diagonale :

Équation 2-6

$$T_{r_{\text{assemblage}}} = \frac{T_{r_{\text{diagonale}}} \times R_y}{\phi} = \frac{T_{r_{\text{diagonale}}} \times 1.1}{0.9} = 1.22 \times T_{r_{\text{diagonale}}}$$

Compression

La résistance en compression des assemblages doit excéder la résistance ultime anticipée en compression des diagonales. Conformément à l'article 13.3.1, la résistance pondérée en compression des diagonales est donnée par :

Équation 2-7

$$C_r = \phi A F_y (1 + \lambda^{2n})^{-1/n}, \text{ où } \lambda = \frac{KL}{r} \sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 E}}$$

Dans cette équation, λ est le rapport d'élancement adimensionnel des diagonales. Le coefficient n dépend du type de section utilisée pour les diagonales. Pour les profilés tubulaires formés à froid, $n = 1.34$. À l'article 27.5.4.2, la résistance ultime probable en compression des diagonales est :

Équation 2-8

$$C_u = 1.2 \left[A R_y F_y (1 + \lambda^{2n})^{-1/n} \right], \text{ où } \lambda = \frac{KL}{r} \sqrt{\frac{R_y F_y}{\pi^2 E}}$$

La valeur de C_u pour les diagonales très trapues peut être limitée à $A R_y F_y$.

La résistance en compression des diagonales diminue après le flambement, ce qui peut donner des scénarios d'efforts plus critiques dans la charpente. Pour évaluer ces efforts, la norme S16 suggère une valeur pour la résistance post-voilement des diagonales :

$$C_u' = \min(0.2 A R_y F_y ; C_{u,a})$$

2.2.1.3 Poutres, poteaux et autres assemblages

L'article 27.5.5.1 prescrit que les poutres, les poteaux et les autres assemblages doivent être conçus pour supporter les charges gravitationnelles combinées aux efforts induits lorsque les diagonales atteignent leur résistance T_u et C_u .

2.2.1.4 Limite supérieur des efforts de conception

La norme S16 indique que les efforts de conception pour les éléments qui demeurent élastiques peuvent être limités à ceux produits par des charges sismiques déterminées avec R_d et R_o . Dans le calcul des efforts, on doit cependant prendre en considération le flambement possible des diagonales.

2.3 Concept du fusible

La conception par capacité fournit aux éléments structuraux adjacents, des résistances dépassant de manière significative les efforts correspondants aux charges de conception du CNBC2005. Une partie importante de ce surplus de résistance est dû au fait que les diagonales sont choisies en fonction de leur résistance pondérée en compression alors que les composantes structurales adjacentes sont choisies en fonction de la résistance anticipée en traction des diagonales. L'Équation 2-9 et la Figure 2-4 reflètent le surplus de résistance, Ω :

Équation 2-9

$$\Omega = \frac{T_u}{C_f = C_r} = \frac{A \cdot R_y \cdot F_y}{\phi \cdot A \cdot F_y \cdot (1 + \lambda^{2n})^{-1/n}} = 1.22 \cdot (1 + \lambda^{2n})^{1/n}$$

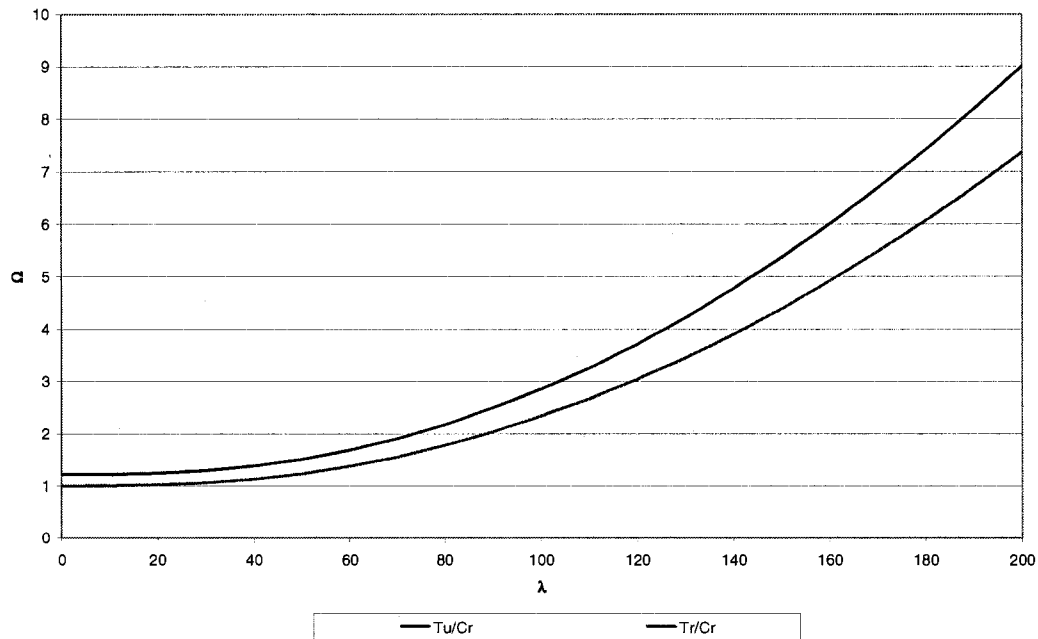


Figure 2-4 : Sur-résistance, Ω , en fonction de λ

Afin d'éviter le surplus de résistance aux composantes adjacentes, nous proposons d'ajouter un fusible à la diagonale qui aura pour particularité de ne pas modifier la résistance en compression de la diagonale, mais qui réduira sa résistance en traction, permettant ainsi de réduire les efforts de conception des composantes structurales adjacentes.

La philosophie de l'ajout de fusibles pour réduire les charges transmises aux composantes structurales adjacentes a déjà fait l'objet de recherches. En particulier, Rezai et al. (2000) ont proposé plusieurs types de fusibles et présentent les résultats de plusieurs essais de fusibles provenant de trois phases d'essais. Les recommandations de l'article proposent de procéder à des essais sur des fusibles formés par l'agencement de quatre (4) cornières ayant une section réduite à l'extérieur de la zone soudée. Nous

procédons justement à l'étude de ce type de fusible dans le présent rapport, et nous présenterons la géométrie retenue dans les prochains paragraphes.

Il est à noter que la rupture prématurée des fusibles ont été observées dans les études antérieures lorsque :

- Le fusible plastifiait en compression, ce qui s'explique par la possibilité de voilement local conduisant à des élongations unitaires très élevés et au fait que l'acier était soumis à des cycles de déformations inélastiques (tension et compression), ce qui très exigeant sur les spécimens;
- Le fusible était trop court et ainsi les élongations unitaires étaient élevées entraînant la rupture.

2.4 Combinaisons de charges

Le CNBC 2005 et la norme S16-01 prescrivent les combinaisons de charge à considérer dans la conception. Pour la conception parasismique, on y retrouve :

« Dans le cas de combinaison des charges, y compris celles dues au séismes, l'effet des charges pondérées, en unité de force, représente l'effet sur la structure dû aux charges prévues. La combinaison des charges pondérées est donnée par l'expression :

A. $1.0D + \gamma(1.0E)$;

B. soit

a. $1.0D + \gamma(1.0L + 1.0E)$ pour les entrepôts et les aires de rassemblement ; ou

b. $1.0D + \gamma(0.5L + 1.0E)$ pour les autres usages prévus d'un bâtiment. »²

² Référence : CAN/CSA-S16-01, p.20

Dans ces équations, D, L, et E sont respectivement la charge permanente, la charge d'occupation, la charge de séisme. Dans le cadre de cette étude, nous avons retenu la combinaison A. et b.

CHAPITRE 3 – ÉTUDE PARAMÉTRIQUE

3.1 Introduction

L'étude paramétrique a été la première étape entreprise dans le cadre de ce projet. Cette étude avait pour but de valider l'utilisation de fusibles afin de réduire les efforts induits par les diagonales lors d'un séisme important.

L'étude paramétrique consiste essentiellement en l'élaboration d'un chiffrier Excel qui génère automatiquement différents bâtiments pour lesquels une analyse statique équivalente est suivie. Suivant cette analyse, les charges sismiques sont identifiées et le chiffrier procède à la sélection des profilés. Finalement, dans le but de valider théoriquement nos motivations à entreprendre cette recherche, le chiffrier vérifie et quantifie le potentiel d'économie pouvant être envisagé suite à l'introduction d'un fusible.

Les prochaines pages de ce chapitre décriront les paramètres retenus lors de la conception du chiffrier. Nous expliquerons, dans un premier temps, nos motivations à entreprendre une telle étude. Nous indiquerons ensuite nos hypothèses de conception incluant les cas de chargements retenus. Nous présenterons les paramètres géométriques retenus pour la constitution des bâtiments. Une fois la charge sismique définie, nous présenterons la méthode de sélection des profilés (HSS rectangulaires) et, nous identifierons les diagonales les plus récurrentes en précisant le potentiel d'économie envisageable par l'ajout d'un fusible.

3.2 Objectif

L'objectif premier est d'identifier le potentiel d'économie pouvant être envisagé par l'ajout de fusibles. Essentiellement, nous voulons observer, suivant toutes les normes canadiennes applicables, les conséquences engendrées par l'ajout d'un fusible.

Le deuxième objectif à entreprendre une étude paramétrique est qu'elle permet

d'orienter le programme expérimental. Les profilés tubulaires sont parmi les profilés les plus populaires pour former les diagonales de contreventement. En générant plusieurs géométries de bâtiments pour lesquelles les profilés formant les diagonales de contreventement sont choisis, nous pouvons identifier quels profilés sont les plus récurrents. Nous pourrions ensuite reproduire expérimentalement les situations les plus représentatives de la réalité.

Pendant la compilation des résultats, nous avons pu confirmer nos résultats en les comparant à un autre chiffrier Excel préparé par *Tremblay et Rogers (2004)*. Une fois les résultats confirmés, nous avons pu agencer les résultats obtenus des deux chiffriers, puisque le second chiffrier contenait des informations complémentaires, notamment quant au diaphragme de toit.

3.3 Hypothèses de conception et paramètres

3.3.1 Normes et code de conception

CAN/CSA-S16-01

CAN/CSA-S16S1-05

CNBC 2005

3.3.2 Localisation

Comme nous l'avons expliqué au chapitre précédent, notre étude porte sur des bâtiments localisés à Vancouver (C-B), et à Montréal (QC).

3.3.3 Charges

Suivant les recommandations du CNB2005, nous pensons que les charges présentées ci-après constituent des valeurs représentatives des charges de conception utilisées par la pratique.

3.3.3.1 Mortes

Tel qu'indiqué précédemment, nous avons considéré que des bâtiments à un (1) étage. En plus du poids mort des poteaux, des poutres et des diagonales, la toiture et les murs extérieurs sont les seuls autres composantes contribuant à la charge morte. Le Tableau 3-1 présente la composition de la charge permanente de la toiture.

Membrane multicouche	:	0.15	
Panneau de bois 19 mm	:	0.12	
Isolant rigide 65 mm	:	0.03	
Pare-vapeur	:	0.1	
Gypse 13 mm	:	0.1	
Tablier métallique 38 mm	:	0.1	
Structure	:	0.2	
Mécanique et électricité	:	0.4	
<hr/>			
Total	:	1.2	kPa

Tableau 3-1 : Composition et évaluation de la charge permanente de la toiture

Nous avons suivi l'hypothèse à l'effet que les murs sont formés de tôles et de laine isolante, ces derniers contribuant pour une charge de 0.2 kPa.

3.3.3.2 Neige

Tel que décrit précédemment, la charge due à la neige est calculée suivant l'équation :

$$S = I_s [S_s (C_b C_w C_s C_a) + S_r]$$

3.3.3.3 Facteur d'importance

Nous avons considéré que les bâtiments ont une vocation industrielle ou commerciale et que par conséquent, ces bâtiments sont de la catégorie d'importance normale. Il n'est

pas impératif que ces bâtiments soient entièrement opérationnels suivant un séisme majeur.

3.3.4 Paramètres de combinaison géométriques

Les bâtiments étudiés sont des bâtiments en acier d'un seul étage de forme rectangulaire. Afin de pouvoir tirer des conclusions pertinentes et éclairées, nous devons englober une majorité de situations rencontrées dans la pratique. Nous avons défini les bâtiments de manière à couvrir toutes les possibilités réalistes à partir de ces paramètres.

Nous avons défini sept (7) superficies de bâtiments à partir desquelles nous établissons la longueur des côtés en fonction de quatre (4) rapports. Le Tableau 3-2 et Tableau 3-3 présentent les paramètres considérés.

Aire des bâtiments	
No.	m²
a	600
b	1,200
c	1,800
d	2,400
e	3,000
f	3,600
g	4,200

Tableau 3-2 : Superficie des bâtiments

Rapport des longueurs des murs (L_{E-O}/L_{N-S})			
No.	L_{E-O}/L_{N-S}	No.	L_{E-O}/L_{N-S}
a	2.0	b, c, d, e, f, g	2.5
	1.0		2.0
			1.5
			1.0

Tableau 3-3 : Rapports des longueurs des murs

Nous avons défini les paramètres de hauteur en fonction de l'aire des bâtiments en suivant l'hypothèse que les bâtiments sont grands sont susceptibles d'être plus hauts. Le Tableau 3-4 résume les hauteurs considérées en fonction de la superficie des bâtiments.

Hauteur, m	Bâtiment						
	a	b	c	d	e	f	g
4.2	x						
4.8	x	x					
5.4	x	x	x				
6.0	x	x	x	x	x	x	x
6.6	x	x	x	x	x	x	x
7.2	x	x	x	x	x	x	x
7.8	x	x	x	x	x	x	x
8.4	x	x	x	x	x	x	x
9.0		x	x	x	x	x	x
9.6			x	x	x	x	x
10.2			x	x	x	x	x
10.8				x	x	x	x
11.4					x	x	x
12.0					x	x	x
12.6					x	x	x

Tableau 3-4 : Hauteur des bâtiments

Puisque nous avons procédé à l'analyse des deux villes, en combinant tous les paramètres, nous obtenons un total de 264 bâtiments par ville, pour un total de 528 bâtiments, et ce, pour chaque type de contreventement. Ainsi, nous comptons 528 bâtiments pour les contreventements de type MD, 528 pour ceux du type LD et 528 pour ceux du type CC. De plus, que les contreventements travaillent en tension seulement, ou en tension compressions, nous devons additionner le nombre de bâtiments en conséquences. Pour résumer, nous obtenons un total de 3168 bâtiments ce qui donne un total de 6336 contreventements.

Cependant, pour les plus grands bâtiments, nous avons supposé que deux contreventements seraient requis par murs. Nous avons supposé que la quantité de contreventement par mur est établie en fonction de la superficie des bâtiments. Ainsi, nous avons considéré que lorsque la superficie du bâtiment était de 2000 m² ou plus, deux (2) contreventements par mur étaient requis.

3.4 Analyse statique équivalente

Comme nous l'avons présenté au chapitre précédent, la charge statique équivalente peut se résumer aux équations suivantes :

$$\frac{S(0.2)I_E W}{R_d R_o} \geq V = \frac{S(T_a)M_v I_E W}{R_d R_o} \geq \frac{S(2.0)M_v I_E W}{R_d R_o}$$

Afin d'expliquer la méthode d'obtention de la charge statique équivalente, nous avons procédé à un exemple numérique en supposant un bâtiment situé à Montréal de 1800 m² (38.7 m x 46.5 m), reposant sur un sol de type C et ayant une hauteur de 8.0 m. Nous supposons aussi que le système de résistance aux charges sismiques est formé de contreventements en X travaillant en tension-compression, et de type MD.

A partir de ces données, la période est de :

$$T_a = 2 \times 0.025 \times 8.0 = 0.4 \text{ sec}$$

On suppose ici que la période réelle des bâtiments sera supérieur à 2.0 fois le résultat de l'Équation 2.5 et on utilise cette limite supérieure. À partir du spectre de calcul pour la ville de Montréal, nous pouvons déterminer, par interpolation linéaire que :

$$S(T_a) = 0.46g$$

Comme nous le mentionnions précédemment, le facteur d'importance, I_E , est fixé à 1.0

et puisque le bâtiment n'a qu'un étage, le facteur des modes supérieurs, M_v , est aussi fixé à 1.0.

La charge de neige est telle que montré au Tableau 3-5.

$$S = I_s [S_s (C_b C_w C_s C_a) + S_r]$$

I_s:	1.00	
S_s:	2.6	kPa
C_b:	0.8	
C_w:	1.0	
C_s:	1.0	
C_a:	1.0	
S_r:	0.4	kPa
∴ S:	2.48	kPa

Tableau 3-5 : Charge de neige

Le poids sismique du bâtiment, W , est obtenu du tableau suivant :

Description	Charge	Aire	Périmètre	Hauteur	Poids
	<i>kPa</i>	<i>m²</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>kN</i>
Morte:	1.20	1,800			2,160
Murs:	0.20		170	8.0	136
25% de la					
neige:	0.62	1,800			1,116
				Σ	3,412

Le poids des murs dépend du périmètre du bâtiment et de sa hauteur. Il est obtenu, pour l'exemple de calculs, à partir de l'équation suivante :

$$0.2kPa \times 170m \times \frac{8.0m}{2} = 136kN$$

Puisque nous avons supposé un sol de type C, les facteurs de fondations F_a et F_v prennent la valeur de 1.0.

Le Tableau 3-6 résume les paramètres à considérer dans cet exemple.

Période (T_a):	0.200	sec.
Période considérée:	0.400	sec.
$S(T_a)$:	0.457	
M_v:	1.00	
I_E:	1.00	
W:	3,412	kN
R_d:	3	
R_o:	1.3	

Tableau 3-6 : Résumé des paramètres considérés

Pour cet exemple, nous avons considéré un contreventement concentrique à ductilité modérée. Le tableau présenté au CNB indique trois configurations de contreventement répondant à ce système de résistance aux charges sismiques, soit, les chevrons, les contreventements travaillant en traction seulement, et les non-chevrons. Puisque nous avons des diagonales en X travaillant en tension-compression, nous prenons les valeurs données pour les non-chevrons, soit R_d de 3 et un R_o de 1.3.

À partir de ces paramètres, nous pouvons établir que la charge statique équivalente est de 400 kN.

Puisque l'aire du bâtiment est inférieure à 2000 m², un contreventement par mur est considéré.

Étant donné que le bâtiment a une forme régulière (rectangulaire), qu'un contreventement est placé à la mi-longueur de chacun des murs, et que nous supposons tous les contreventements ont tous la même rigidité, le centre de masse et le centre de rotation sont au même point. Nous avons considéré une valeur de $0.1D_n$ pour la torsion accidentelle conformément à la valeur requise au CNB, et ce, afin de considérer la torsion accidentelle; D_n étant la dimension du bâtiment dans la direction perpendiculaire à la charge sismique. Le Tableau 3-7 indique l'impact de la torsion induite par l'excentricité accidentelle pour l'analyse sismique dans la direction Nord-Sud³. La Figure 3-1 montre le schéma des directions et des excentricités considérées.

³ Référence pour la méthode de calculs : « Calcul des charpentes d'acier, Tome I, Beaulieu, Picard, Tremblay, Grondin, Massicotte, ICCA, 2003, pp71-81.

Analyse direction Nord-Sud

Contreventements dans la direction x					
Propriétés			Séisme		
Contreventements	γK <i>kN/mm</i>	y <i>mm</i>	K.y ² <i>kN.mm</i>	Δ <i>mm</i>	V <i>kN</i>
2	1	19,365	3.75E+08	19.65	19.65
4	1	-19,365	3.75E+08	-19.65	-19.65
Contreventements dans la direction y					
Propriétés			Séisme		
Contreventements	K <i>kN/mm</i>	x <i>mm</i>	K.x ² <i>kN.mm</i>	Δ <i>mm</i>	V <i>kN</i>
1	1	23,238	5.40E+08	23.58	23.58
3	1	-23,238	5.40E+08	-23.58	-23.58

$\Sigma:$ 1.83E+09

$T_x:$ 1.86E+06 kN.mm

$\theta:$ 1.01E-03 rad

Tableau 3-7 : Efforts dans les contreventements induits par la torsion

accidentelle pour une analyse sismique dans la direction Nord-Sud

Le Tableau 3-8 indique l'impact de la torsion accidentelle lorsque la charge sismique est appliquée dans la direction est-ouest.

Analyse direction Est-Ouest

Contreventements dans la direction x					
Propriétés			Séisme		
	γK	y	$K.y^2$	Δ	V
Contreventements	<i>kN/mm</i>	<i>mm</i>	<i>kN.mm</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>
2	1	19,365	3.75E+08	16.38	16.38
4	1	-19,365	3.75E+08	-16.38	-16.38
Contreventements dans la direction y					
Propriétés			Séisme		
	K	x	$K.x^2$	Δ	V
Contreventements	<i>kN/mm</i>	<i>mm</i>	<i>kN.mm</i>	<i>mm</i>	<i>kN</i>
1	1	23,238	5.40E+08	19.65	19.65
3	1	-23,238	5.40E+08	-19.65	-19.65

$\Sigma:$ 1.83E+09

$T_x:$ 1.55E+06 kN.mm

$\theta:$ 8.46E-04 rad

Tableau 3-8 : Efforts dans les contreventements induits par la torsion accidentelle pour une analyse sismique dans la direction Est-Ouest

Dans la direction Nord-Sud, D_n est égale à 46476 mm. L'excentricité due à la torsion accidentelle est ainsi égale à 4648mm, et induit donc un couple de torsion équivalent à :

$$T_x = V \times 0.1 D_n = 400 \text{ kN} \times 0.1 \times 46476 \text{ mm} = 1.86 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

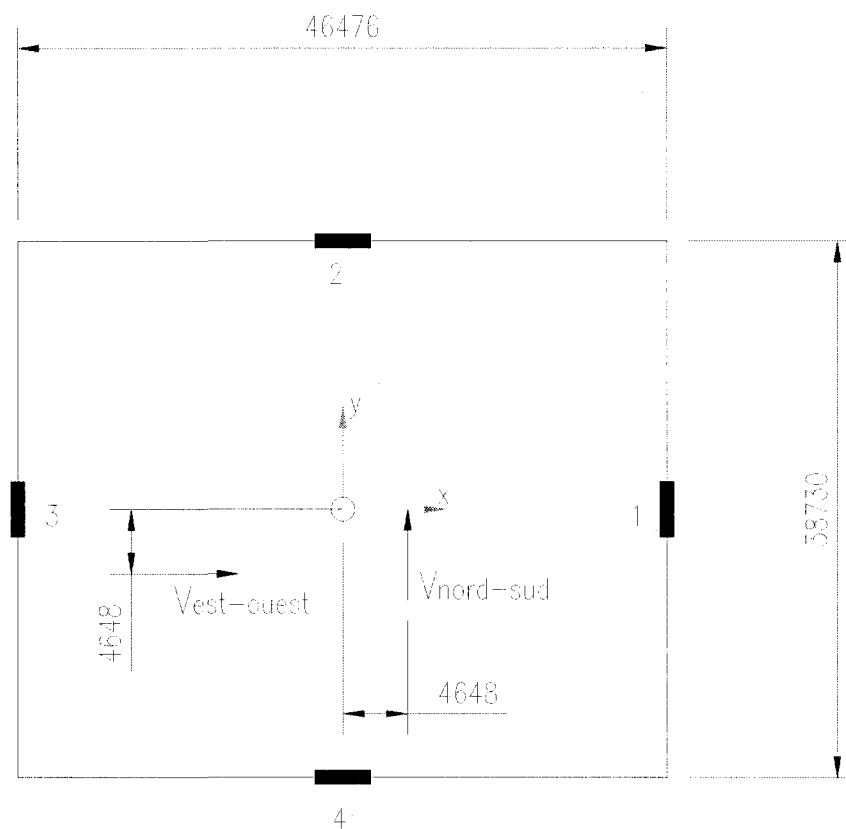


Figure 3-1 : Torsion accidentelle

À partir des résultats obtenus aux tableaux précédents, les contreventements dans la direction N-S doivent résister à une charge de 223.36 kN ($= 400/2 + 23.58$) et les contreventements dans la direction E-O à une charge de 219.43 kN ($= 400/2 + 19.65$).

3.5 Distribution de la charge sismique

La charge latérale définie, elle doit être acheminée vers les fondations. Nous avons considéré deux (2) types de contreventements reprenant les charges latérales.

La Figure 3-2 et la Figure 3-3 présentent, respectivement, des contreventements typiques travaillant en tension-compression et en traction seulement.

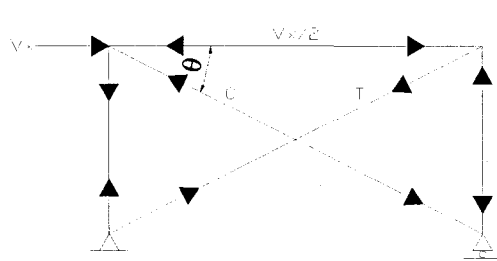


Figure 3-2: Tension-compression

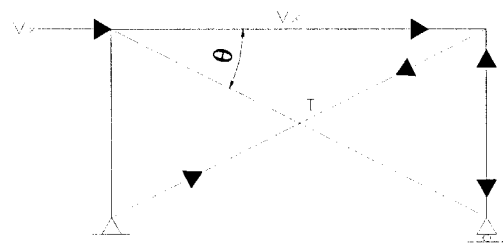


Figure 3-3: Tension seulement

Dans le cas des contreventements travaillant en tension-compression (T/C), la charge reprise dans chacune des diagonales est donnée par :

$$T_f = C_f = \frac{V_x}{2 \cos \theta}$$

Pour ce qui est des contreventements travaillant en tension seulement (T/O), la force V_x est entièrement reprise par la diagonale tendue, et l'effort dans cette dernière est donnée par :

$$T_f = \frac{V_x}{\cos \theta}$$

3.6 Sélection des profilés

Une fois les charges déterminées, le chiffrer de l'étude paramétrique procède à la sélection des profilés. Afin d'être représentatif de la réalité, les paramètres de l'étude paramétrique indiquent de choisir le profilé le plus léger. Cependant, il est à noter que les charges de gravité sur la diagonales ont été négligées.

Afin qu'un profilé soit admissible, les conditions de la norme S16S1-05 décrites précédemment doivent être respectées. Dépendant du SRFS choisi, les profilés doivent notamment respecter les conditions quant au rapport d'élancement (KL/r) et du rapport de voilement local (b/t). Évidemment, la résistance pondérée des profilés choisis doit aussi être égal ou plus élevée que les efforts de conception.

3.7 Conception des fusibles

Une fois la diagonale choisie, nous pouvons procéder à la conception du fusible. Le chiffrer de l'étude paramétrique indique l'aire de la section. Cette dernière doit respecter deux (2) conditions afin d'être admissible. Tout d'abord, la résistance pondérée en traction du fusible, $T_{r,F}$, doit être égale ou plus grande que l'effort de traction de conception, T_f . Ensuite, la résistance du fusible en compression doit être plus grande que la résistance de rupture probable en compression, $C_{u,a}$. La première condition se traduit par :

Équation 3-1

$$T_{r,F} = \phi A_F F_{y,F} \geq T_f$$

Le fusible proposé est conçu pour ne pas flamber. Nous supposons donc que le fusible a une résistance pondérée en compression équivalente à celle en traction ($T_{r,F} = C_{r,F} \geq \phi A_F F_{y,F}$). La seconde condition s'exprime donc :

$$C_{r,F} = \phi A_F F_{y,F} \geq C_{u,a}$$

La résistance de la diagonale, $C_{u,a}$, est donnée à l'Équation 2-8.

Par conséquent, l'aire du fusible est obtenue en vérifiant l'équation suivante :

Équation 3-2

$$A_F \geq \max \left(\frac{C_{u_{diagonale}}}{\phi F_{y,F}}, \frac{T_f}{\phi F_{y,F}} \right)$$

3.8 Résultats

Un des objectifs de cette étude paramétrique est de quantifier le potentiel d'économie pouvant être envisagé par l'ajout d'un fusible aux diagonales de contreventements. Plus précisément, nous sommes intéressés à connaître le potentiel d'économie au niveau des composantes structurales adjacentes (assemblages, poutres et colonnes) et au niveau du tablier de toit agissant comme diaphragme.

Dans cette section, nous présenterons, dans un premier temps, les méthodes suivies pour quantifier le potentiel d'économie en nous concentrant sur un bâtiment type. Par la suite, nous présenterons l'ensemble des résultats obtenus de l'éventail de bâtiments étudiés. Finalement, à partir de ces résultats, nous commenterons les résultats obtenus.

3.8.1 Potentiel d'économie aux assemblages et aux poteaux

La norme S16 requiert que les assemblages des diagonales dans les contreventements de type MD et LD doivent résister à une force de traction équivalente à la capacité ultime probable des diagonales (voir Équation 3-3) et à une force de compression équivalente au résultat de l'Équation 3-4.

Équation 3-3

$$T_{u,a} = AR_y F_y$$

Équation 3-4

$$C_{u,a} = 1.2 \left[AR_y F_y (1 + \lambda^{2n})^{-1/n} \right]$$

$$\lambda = \frac{KL}{r} \sqrt{\frac{R_y F_y}{\pi^2 E}}$$

Pour les contreventements travaillant en tension-compression, la force $T_{u,a}$ peut atteindre des valeurs beaucoup plus élevées que $C_{u,a}$, selon l'élancement de la diagonale (voir Figure 2.4). Ainsi, en introduisant un fusible dont la résistance en traction est inférieure à la résistance de la diagonale, $T_{u,a}$, mais supérieure à la résistance de la diagonale en compression, $C_{u,a}$, nous pouvons nous attendre à enregistrer des économies lors de la conception des assemblages.

Retournons à l'exemple de calculs amorcé précédemment pour mieux présenter le potentiel d'économie pouvant être envisagé. À titre de rappel, nous avons procédé à l'analyse statique équivalente d'un bâtiment de 1800 m² (38.7m × 46.5m), ayant une hauteur de 8m, situé à Montréal, reposant sur un sol de type C. La distance entre les colonnes est de 5809mm. Le système de résistance aux charges sismiques est composé de contreventements en « X » à ductilité modérée (MD) travaillant en tension-compression. L'analyse statique équivalente, incluant l'effet de la torsion accidentelle, conduit à des efforts de conception pour les diagonales de $C_f = T_f = 178kN$.

À partir de ces données, l'étude paramétrique indique que le profilé tubulaire admissible le plus léger est un HSS102x102x6.4. Les propriétés de cette section sont :

L :	9890 mm
r :	38.4 mm
KL/r :	129
A :	2320 mm ²
t :	6.35 mm
F_y :	345 MPa
b/t :	12.06

La limite quant au rapport b/t est obtenu à partir de l'équation suivante :

$$\begin{array}{l}
 KL/r \rightarrow b/t \\
 100 \rightarrow 330/\sqrt{F_y} \\
 129 \rightarrow x/\sqrt{F_y} \\
 200 \rightarrow 420/\sqrt{F_y}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 200-100 \rightarrow 420/\sqrt{F_y} - 330/\sqrt{F_y} \\
 129-100 \rightarrow x/\sqrt{F_y} - 330/\sqrt{F_y}
 \end{array}
 \right\} \therefore x = 356$$

$$\therefore \frac{b}{t} = 12.06 \leq \frac{356}{\sqrt{F_y}} = 19.17$$

Pour cette configuration, le profilé tubulaire choisi développe une résistance de 720kN en traction (T_r) et 200kN en compression (C_r). Déjà, nous pouvons remarquer la grande différence entre la résistance en traction du profilé ($T_r = 720kN$), et la charge de conception ($T_f = 178kN$).

Dans l'éventualité que la conception se fait sans qu'un fusible ne soit ajouté, l'assemblage devra résister à un effort $T_{u,a} = 881kN$ en traction et $C_{u,a} = 288kN$ en

compression.

En utilisant l'Équation 3-2, l'aire du fusible choisi doit être d'au moins 925 mm², ce qui est beaucoup plus petite que l'aire du profilé utilisé ($A = 2320\text{mm}^2$). En considérant l'aire du fusible, l'effort de conception des assemblages n'est plus calculé en fonction de l'aire du profilé tubulaire (Équation 3-3), mais en fonction de l'aire des fusibles et est obtenue de l'équation suivante :

$$T_{u,a,F} = A_F R_{y,F} R_{SH} F_{y,F} = \frac{925}{1000^2} \times 1.1 \times 1.5 \times 345 \times 10^3 = 526.5\text{kN}$$

Il est à remarquer qu'un facteur, R_{SH} , a été ajouté. Ce facteur prend en considération l'augmentation de la résistance du fusible en raison de l'écrouissage. Nous avons supposé une valeur de 1.5 pour ce paramètre dans l'étude paramétrique. Cette valeur sera confirmée par l'étude expérimentale.

Afin de quantifier l'économie, nous utiliserons le pourcentage de réduction de l'effort de traction pour la conception des assemblages, β :

Équation 3-5

$$\beta = \frac{T_{u,a} - T_{u,a,F}}{T_{u,a}} \times 100\%$$

En introduisant les valeurs obtenues pour l'exemple de calcul, nous obtenons, une réduction de 40% de l'effort de conception des assemblages :

$$\beta = \frac{881 - 527}{881} \times 100\% = 40\%$$

Nous avons présenté aux paragraphes précédents la méthode suivie pour la présentation des économies envisagées. De plus, nous avons présenté à l'aide d'un exemple de calculs l'économie pouvant être envisagé pour un cas particulier. Nous présenterons dans les prochaines sections les résultats obtenus pour tous les bâtiments analysés. Nous présentons les résultats que nous avons obtenus pour les contreventements travaillant en tension-compression. Nous avons donc décidé de ne pas présenter les résultats obtenus pour les contreventements travaillant en tension seulement ayant un fusible, puisque l'ajout de fusibles à ces contreventements n'est pas économique, voire même pénalisant. Pour les contreventements travaillant en tension seulement, la diagonale est choisie en fonction de la force de sollicitation en tension. Donc, à moins que le choix de la diagonale ne soit gouverné par les rapports de parois (b/t), les économies possibles sont nulles. Par contre, nous comparerons les résultats obtenus entre les contreventements travaillant en tension-compression ayant des fusibles, aux contreventements travaillant en tension seulement sans fusible.

Dans un premier temps, nous présentons, à la Figure 3-4, le potentiel d'économie, β , en fonction du rapport d'élancement, pour les contreventements du type MD et LD. Les points sur la figure représentent l'ensemble des diagonales choisies dans les bâtiments étudiés.

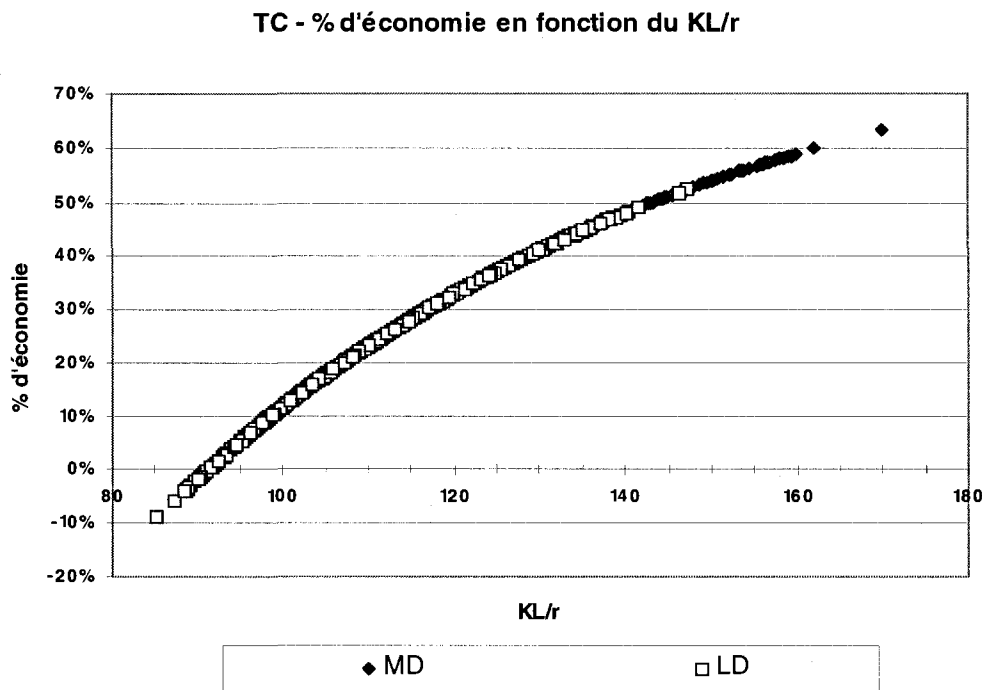


Figure 3-4 : % d'économie en raison de l'ajout du fusible
en fonction du rapport d'élancement

Comme nous pouvons le remarquer, plus le facteur d'élancement augmente, plus le potentiel d'économie augmente. Comme nous le savons, à mesure que l'élancement augmente, la résistance en compression diminue, et ainsi, l'écart entre la résistance en traction et la résistance en compression augmente, faisant augmenter le potentiel d'économie. Suivant ces résultats, nous notons que les contreventements de type MD ont un potentiel d'économie moyen de 36% et les contreventements de type LD ont pour leur part, une économie moyenne de 23%. Nous remarquons aussi que l'ajout d'un fusible pour les contreventements travaillant en TC de type MD et LD est avantageux si le facteur d'élancement, KL/r , est plus grand que 90, soit la très grande majorité des diagonales choisies.

Nous voulions aussi pouvoir comparer la solution proposant une conception utilisant des contreventements à ductilité modérée et à ductilité limitée avec fusibles par rapport à une conception suivant les prescriptions de la construction conventionnelle.

La Figure 3-5 présente le rapport des forces de traction des diagonales ($T_{u,a}; T_{u,a,F}$) pour les contreventements de type MD aux forces de traction des diagonales pour les contreventements de type CC en fonction de l'aire de bâtiments analysés. Nous avons aussi inclus des courbes de tendances de type linéaire. Comme nous pouvons le remarquer, les contreventements à ductilité modérée sont plus économiques que les contreventements suivant les prescriptions de la construction conventionnelle. Dans le cas où aucun fusible n'était ajouté au contreventement de type MD (courbe de tendance en ligne pleine), la conception des diagonales, des assemblages et des poteaux seraient en moyenne 16% plus économique que l'approche de la construction conventionnelle. Cette économie est augmentée à 46% si un fusible est ajouté au contreventement de type MD (courbe de tendance en ligne pointillée).

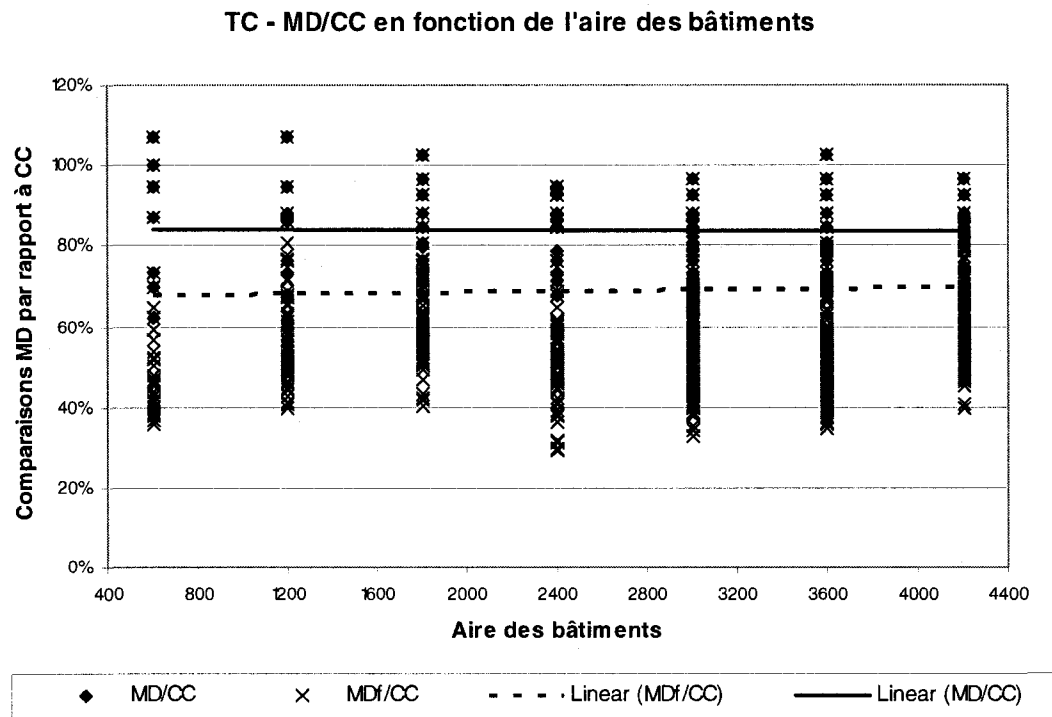


Figure 3-5 : Rapport des forces de tractions (T_u) pour les contreventements type MD
par rapport à CC

La Figure 3-6 présente le rapport des forces de traction des diagonales ($T_{u,a}; T_{u,a,F}$) pour les contreventements de type LD aux forces de traction des diagonales pour les contreventements de type CC en fonction de l'aire de bâtiments analysés. Nous avons aussi inclus des courbes de tendances de type linéaire. Comme nous pouvons le remarquer, les contreventements à ductilité limitée sont moins économique que les contreventements suivant les prescriptions de la construction conventionnelle dans le cas qu'aucun fusible ne soit ajouté à la diagonale des contreventements de type LD. Plus précisément, dans le cas qu'aucun fusible ne soit ajouté au contreventement de type LD (courbe de tendance en ligne pleine), la conception des diagonales, des assemblages et des poteaux seraient en moyenne 5% moins économique que

l'approche de la construction conventionnelle. Par contre, dans le cas qu'un fusible est ajouté, nous pouvons noter une économie de l'ordre de 19% par rapport à la construction conventionnelle (courbe de tendance en ligne pointillée).

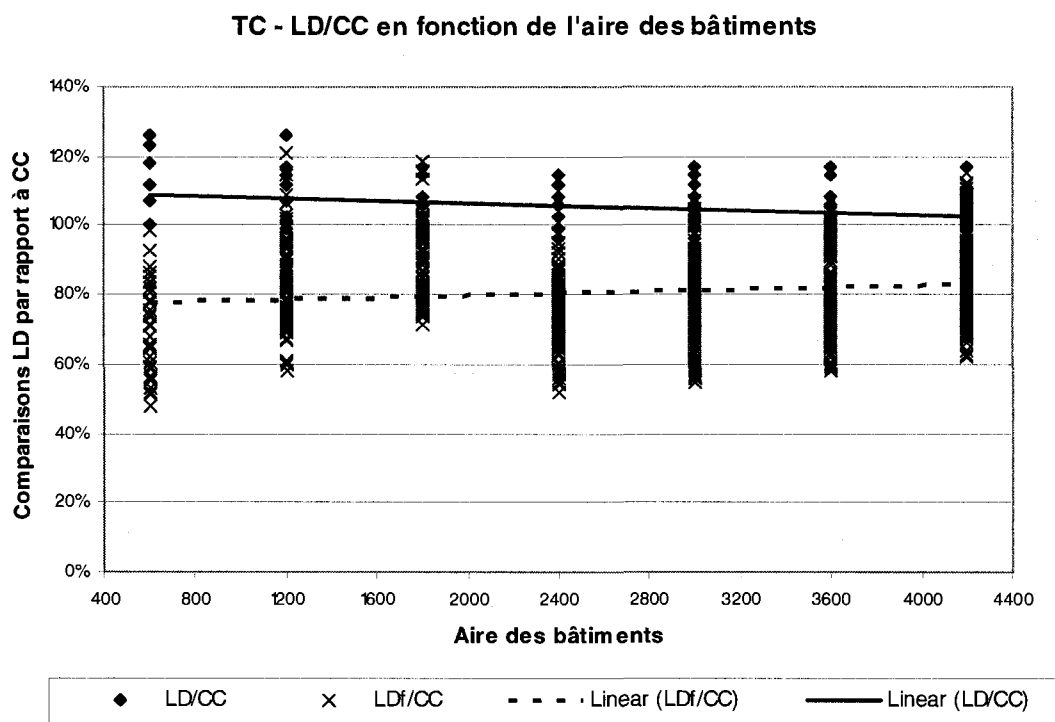


Figure 3-6 : Rapport des forces de tractions (T_u) pour les contreventements type LD par rapport à CC

En observant la Figure 3-5 et la Figure 3-6 nous remarquons qu'une conception de type MD ou LD avec fusibles est plus économique qu'une conception suivant les prescriptions d'une construction conventionnelle.

Nous allons maintenant vérifier si les contreventements travaillant en tension-compression avec fusibles sont plus économiques que les contreventements travaillant en tension seulement sans fusible. La Figure 3-7 présente le rapport des forces de

traction des diagonales ($T_{u,a}; T_{u,a,F}$) pour les contreventements de type MD travaillant en tension-compression aux forces de traction des diagonales pour les contreventements de type MD travaillant en tension seulement, en fonction de l'aire de bâtiments analysés. Nous avons aussi inclus des courbes de tendances de type linéaire. Comme nous pouvons le remarquer, les contreventements travaillant en tension-compression sont moins économiques que les contreventements travaillant en tension-seulement, et ce, qu'un fusible soit ajouté ou pas. Plus précisément, dans le cas où aucun fusible ne soit ajouté au contreventement travaillant en TC, la conception serait en moyenne 65% moins économique que si la conception a été réalisée suivant l'utilisation de contreventement travaillant en tension-seulement (courbe de tendance en ligne pleine). Cependant, dans l'éventualité qu'un fusible soit ajouté aux contreventements travaillant en TC, la conception serait moins économique par 5% par rapport à la conception suivant les contreventements travaillant en tension seulement (courbe de tendance en ligne pointillée).

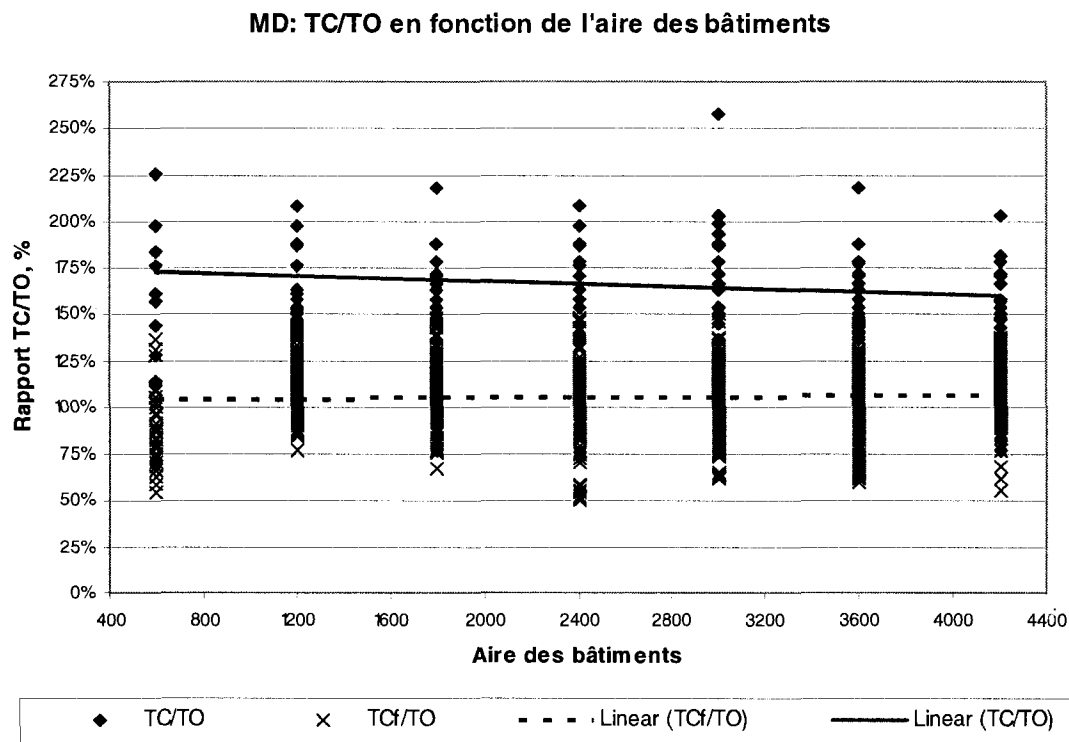


Figure 3-7 : Rapport des forces de tractions (T_u) pour les contreventements type TC par rapport à ceux travaillant en TO

La Figure 3-8 présente le rapport des forces de traction des diagonales ($T_{u,a}; T_{u,a,F}$) pour les contreventements de type LD travaillant en tension-compression aux forces de traction des diagonales pour les contreventements de type LD travaillant en tension seulement, en fonction de l'aire de bâtiments analysés. Nous avons aussi inclus des courbes de tendances de type linéaire. Comme nous pouvons le remarquer, les contreventements travaillant en tension-compression sont moins économiques que les contreventements travaillant en tension-seulement, et ce, qu'un fusible soit ajouté ou pas. Plus précisément, dans le cas où aucun fusible ne soit ajouté au contreventement travaillant en TC, la conception serait en moyenne 55% moins économique que si la conception a été réalisée suivant l'utilisation de contreventement travaillant en tension-

seulement (courbe de tendance en ligne pleine). Cependant, dans l'éventualité qu'un fusible soit ajouté aux contreventements travaillant en TC, la conception serait moins économique par 16% par rapport à la conception suivant les contreventements travaillant en tension seulement (courbe de tendance en ligne pointillée).

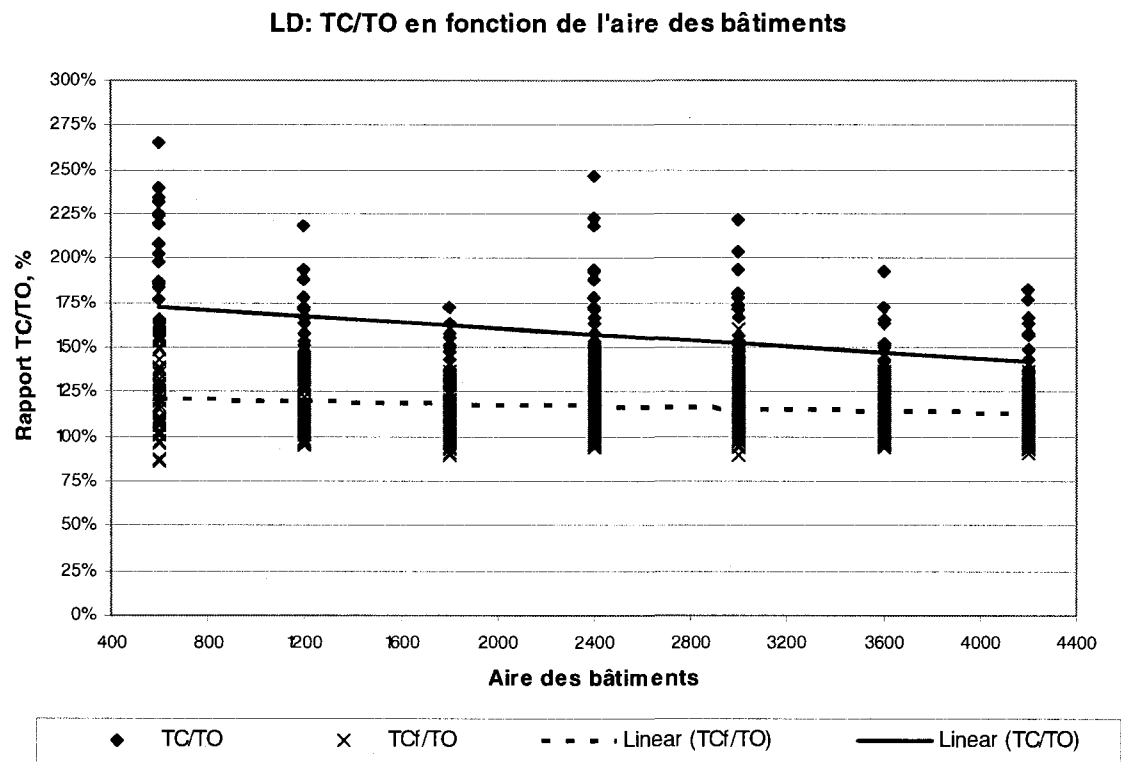


Figure 3-8 : Rapport des forces de tractions (T_u) pour les contreventements type TC par rapport à ceux travaillant en TO

3.8.2 Potentiel d'économie au diaphragme de toit

Le potentiel d'économie sur le diaphragme de toit est obtenu sensiblement de la même manière que pour l'économie aux assemblages. Tel que montré à l'Équation 3-6, le diaphragme de toit est sollicité par un effort correspondant à la somme des composantes horizontales des résistances ultimes probables en traction et en

compression des diagonales.

Équation 3-6

$V_u = (T_{u,a} + C_{u,a}) \cdot \cos \theta$, où θ correspond à l'angle des diagonales par rapport à l'horizontale.

Lorsqu'un fusible est ajouté aux diagonales, l'équation pour l'obtention de de l'effort tranchant transmis au tablier du toit est :

$$V_{u,F} = (T_{u,a,F} + C_{u,a}) \cdot \cos \theta$$

La réduction (%) de l'effort tranchant au toit est ainsi donnée par :

$$\beta_{\text{toit}} = \frac{V_u - V_{u,F}}{V_u} \times 100\%$$

Cette équation peut être réécrite sous la forme suivante :

$$\beta_{\text{toit}} = \frac{(T_{u,a} + C_{u,a}) \cdot \cos \theta - (T_{u,a,F} + C_{u,a}) \cdot \cos \theta}{(T_{u,a} + C_{u,a}) \cdot \cos \theta} \times 100\%$$

$$\beta_{\text{toit}} = \frac{T_{u,a} + C_{u,a} - T_{u,a,F} - C_{u,a}}{T_{u,a} + C_{u,a}} \times 100\%$$

Équation 3-7

$$\beta_{\text{toit}} = \frac{T_{u,a} - T_{u,a,F}}{T_{u,a} + C_{u,a}} \times 100\%$$

En appliquant les résultats de l'exemple de calcul amorcé précédent, nous obtenons, suivant l'Équation 3-7, une économie, pour le tablier de toit, de l'ordre de 45%.

$$\beta_{\text{toit}} = \frac{881 - 351}{881 + 287} \times 100\% = 45\%$$

Nous remarquons que la réduction des efforts pour le calcul du diaphragme de toit sera moins grande que celle pour les assemblages. Puisque l'économie au niveau du tablier de toit est établie en fonction de l'addition des forces de tension et de compression, alors que l'économie au niveau des assemblages est calculée qu'en fonction de la charge de traction, nous comprenons mieux les raisons des baisses du potentiel d'économie. D'ailleurs, et comme nous pouvons le remarquer à l'Équation 3-7, le dénominateur est augmenté par la valeur de compression, ce qui est inversement proportionnelle au potentiel d'économie pouvant être envisagé.

De la même manière que nous l'avons établi pour les diagonales, nous présenterons dans les prochaines figures les potentiels d'économie que nous pouvons espérer au niveau de la conception du tablier de toit, et dans le cas où nous ajoutons des fusibles aux diagonales. Nous comparerons ensuite les résultats obtenus pour les conceptions de types MD et LD travaillant en tension-compression par rapport aux conceptions établies suivant les prescriptions de la construction conventionnelle et celles suivant des contreventements travaillant en tension-seulement.

Dans un premier temps, et comme le montre la Figure 3-9, nous présentons le potentiel d'économie au diaphragme de toit, β_{toit} , en fonction du rapport d'élancement, et ce, pour les contreventements du type MD et LD.

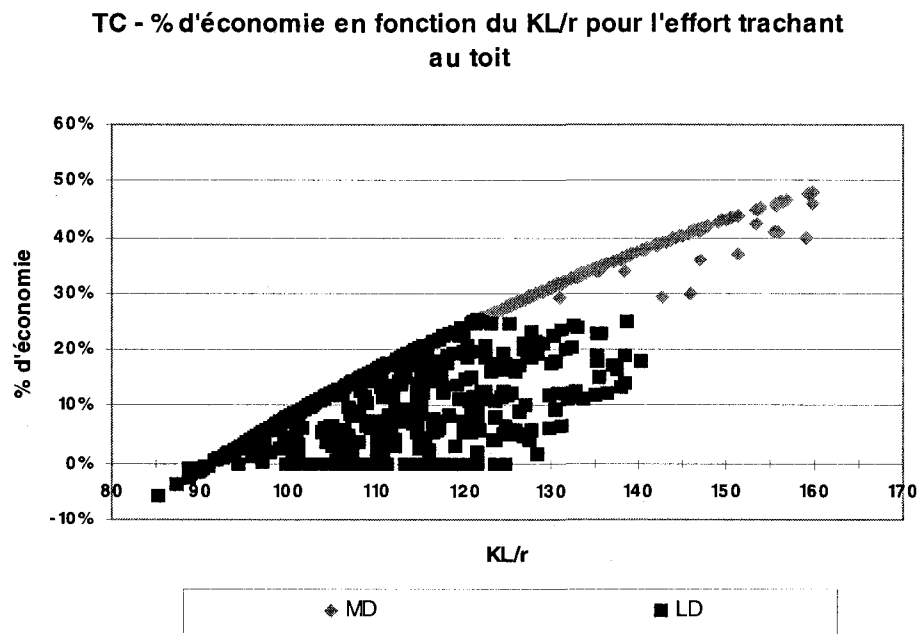


Figure 3-9 : Réduction de l'effort tranchant du toit
en fonction du rapport d'élancement des diagonales

Comme nous pouvons le remarquer, plus le facteur d'élancement augmente, plus le potentiel d'économie augmente. Comme nous le savons, à mesure que l'élancement augmente, la résistance en compression diminue, et ainsi, l'écart entre la résistance en traction et la résistance en compression augmente, faisant augmenter le potentiel d'économie. Suivant les résultats obtenus, les contreventements de type MD ont un potentiel d'économie moyen de 26% et les contreventements de type LD ont pour leur part, une économie moyenne de 10%. Comme discuté, le potentiel d'économie est plus faible que celui obtenu pour les diagonales.

L'ajout d'un fusible pour les contreventements travaillant en TC de type MD et LD est avantageux. Cependant, nous voulions aussi pouvoir comparer la solution proposant une conception utilisant des contreventements à ductilité modérée et à ductilité limitée

par rapport à une conception suivant les prescriptions de la construction conventionnelle.

La Figure 3-10 présente le rapport des efforts tranchants au toit ($V_{u,a}; V_{u,a,F}$) pour les contreventements de type MD aux efforts tranchants au toit pour les contreventements de type CC en fonction de l'aire de bâtiments analysés. Nous avons aussi inclus des courbes de tendances de type linéaire. Les contreventements à ductilité modérée sont plus économique que les contreventements suivant les prescriptions de la construction conventionnelle. Dans le cas qu'aucun fusible ne soit ajouté au contreventement de type MD (courbe de tendance en ligne pleine), la conception du tablier de toit serait en moyenne 20% plus économique que l'approche de la construction conventionnelle. Cette économie est augmentée à 41% si un fusible est ajouté au contreventement de type MD (courbe de tendance en ligne pointillée).

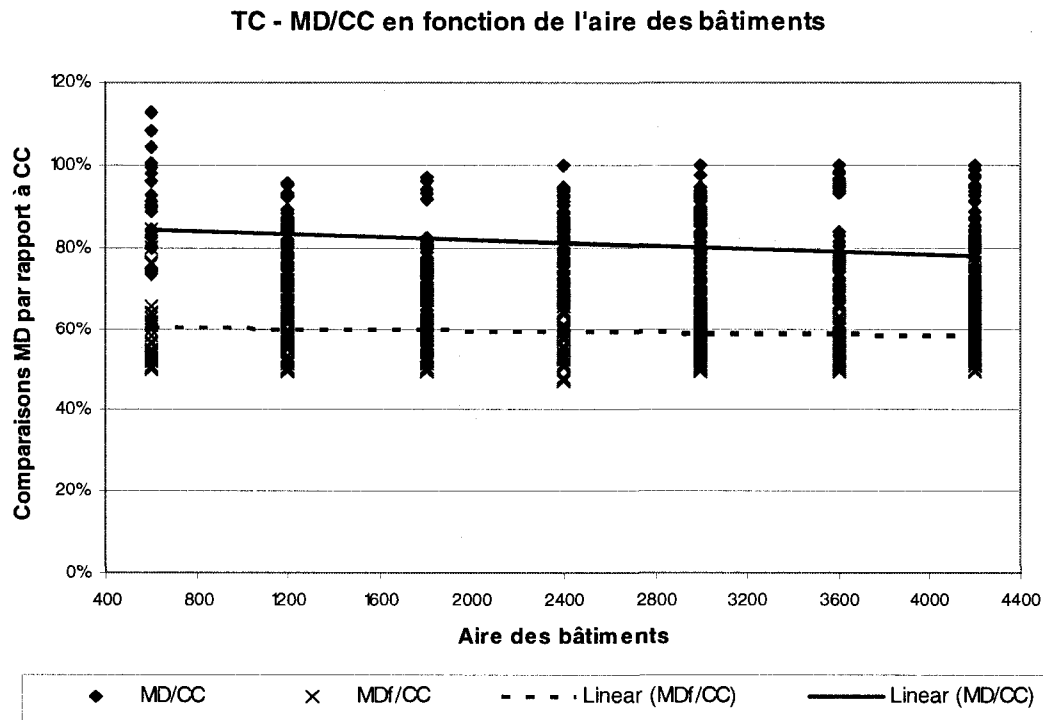


Figure 3-10 : Rapport des efforts tranchants au toit (V_u) pour les contreventements type MD par rapport à ceux de types CC

La Figure 3-11 présente le rapport des efforts tranchants au toit ($V_{u,a}; V_{u,a,F}$) pour les contreventements de type LD aux efforts tranchants au toit pour les contreventements de type CC en fonction de l'aire de bâtiments analysés. Nous avons aussi inclus des courbes de tendances de type linéaire. Comme nous pouvons le remarquer, les contreventements à ductilité limitée sont plus économique que les contreventements suivant les prescriptions de la construction conventionnelle dans le cas qu'aucun fusible ne soit ajouté à la diagonale des contreventements de type LD. Plus précisément, dans le cas qu'aucun fusible ne soit ajouté au contreventement de type LD (courbe de tendance en ligne pleine), la conception du tablier de toit serait en moyenne 2% plus économique que l'approche de la construction conventionnelle. Dans le cas qu'un

fusible soit ajouté, nous pouvons noter une économie de l'ordre de 11% par rapport à la construction conventionnelle (courbe de tendance en ligne pointillée).

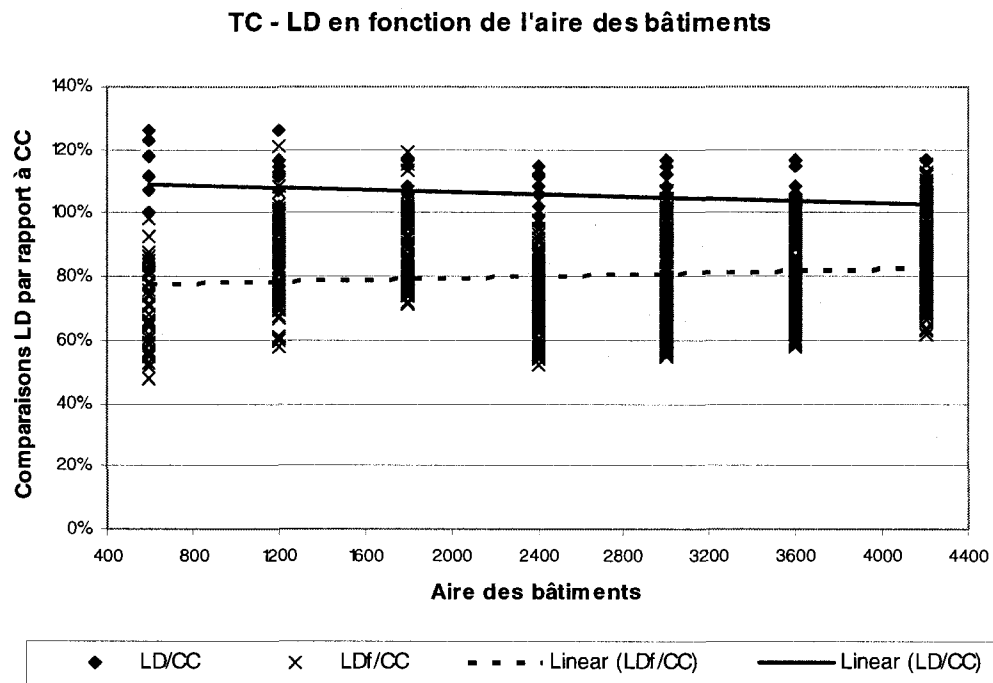


Figure 3-11: Rapport des efforts tranchants au toit (V_u) pour les contreventements type LD par rapport à ceux de types CC

En observant la Figure 3-10 et la Figure 3-11, nous remarquons qu'une conception de type MD et LD ajoutant des fusibles est plus économique en comparaison à une conception suivant les prescriptions d'une construction conventionnelle.

Nous allons maintenant vérifier si les contreventements travaillant en tension-compression ayant des fusibles sont plus économiques que les contreventements travaillant en tension seulement sans fusible. Nous avons montré précédemment que les diagonales travaillant en tension seulement sont plus économiques que celles

travaillant en tension-compression auxquelles un fusible a été ajouté.

La Figure 3-12 présente le rapport des efforts tranchants au toit ($V_{u,a}; V_{u,a,F}$) pour les contreventements de type MD travaillant en tension-compression aux efforts tranchants transmis au toit par les contreventements de type MD travaillant en tension seulement, et ce en fonction de l'aire de bâtiments analysés. Nous avons aussi inclus des courbes de tendances de type linéaire. Les contreventements travaillant en tension-compression sont moins économiques que les contreventements travaillant en tension-seulement, et ce, qu'un fusible soit ajouté ou pas. Plus précisément, dans le cas où aucun fusible ne soit ajouté au contreventement travaillant en TC, la conception serait en moyenne 81% moins économique que si la conception a été réalisée suivant l'utilisation de contreventement travaillant en tension-seulement (courbe de tendance en ligne pleine). Cependant, dans l'éventualité qu'un fusible soit ajouté aux contreventements travaillant en TC, la conception serait moins économique par 34% par rapport à la conception suivant les contreventements travaillant en tension seulement (courbe de tendance en ligne pointillée).

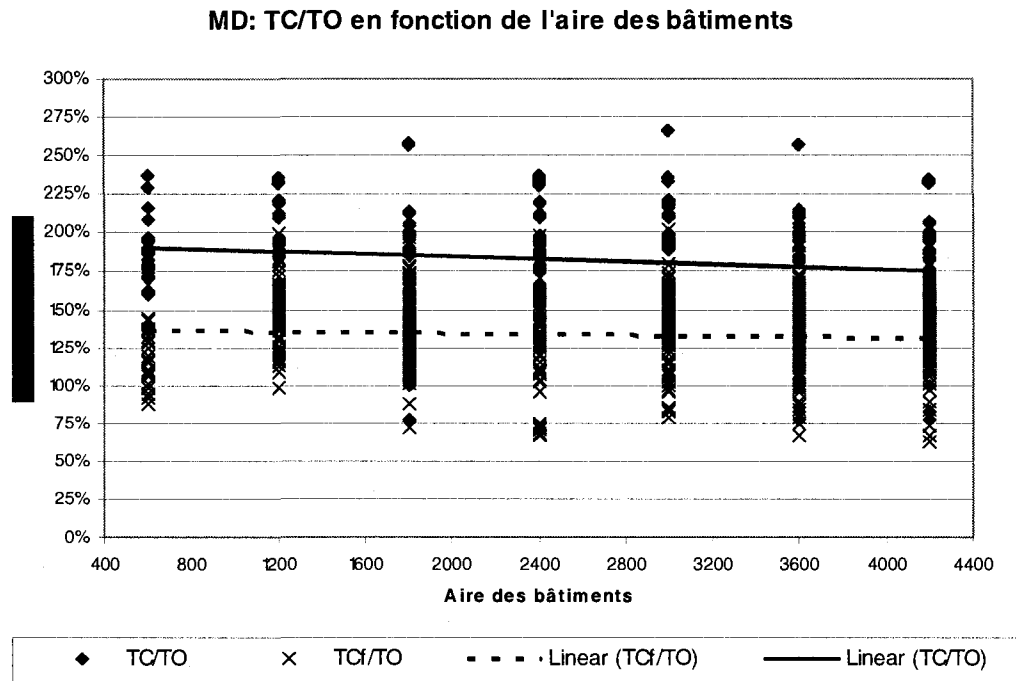


Figure 3-12 : Rapport des efforts tranchants au toit (V_u) pour les contreventements type TC

La Figure 3-13 présente le rapport des efforts tranchants au toit ($V_{u,a}; V_{u,a,F}$) pour les contreventements de type LD aux efforts tranchants transmis au toit par les contreventements de type LD travaillant en tension seulement, et ce en fonction de l'aire de bâtiments analysés. Nous avons aussi inclus des courbes de tendances de type linéaire. Comme nous pouvons le remarquer, les contreventements travaillant en tension-compression sont moins économiques que les contreventements travaillant en tension-seulement, et ce, qu'un fusible soit ajouté ou pas. Plus précisément, dans le cas où aucun fusible ne soit ajouté au contreventement travaillant en TC, la conception serait en moyenne 59% moins économique que si la conception a été réalisée suivant l'utilisation de contreventement travaillant en tension-seulement (courbe de tendance en ligne pleine). Cependant, dans l'éventualité qu'un fusible soit ajouté aux contreventements travaillant en TC, la conception serait moins économique par 43% par

rapport à la conception suivant les contreventements travaillant en tension seulement (courbe de tendance en ligne pointillée).

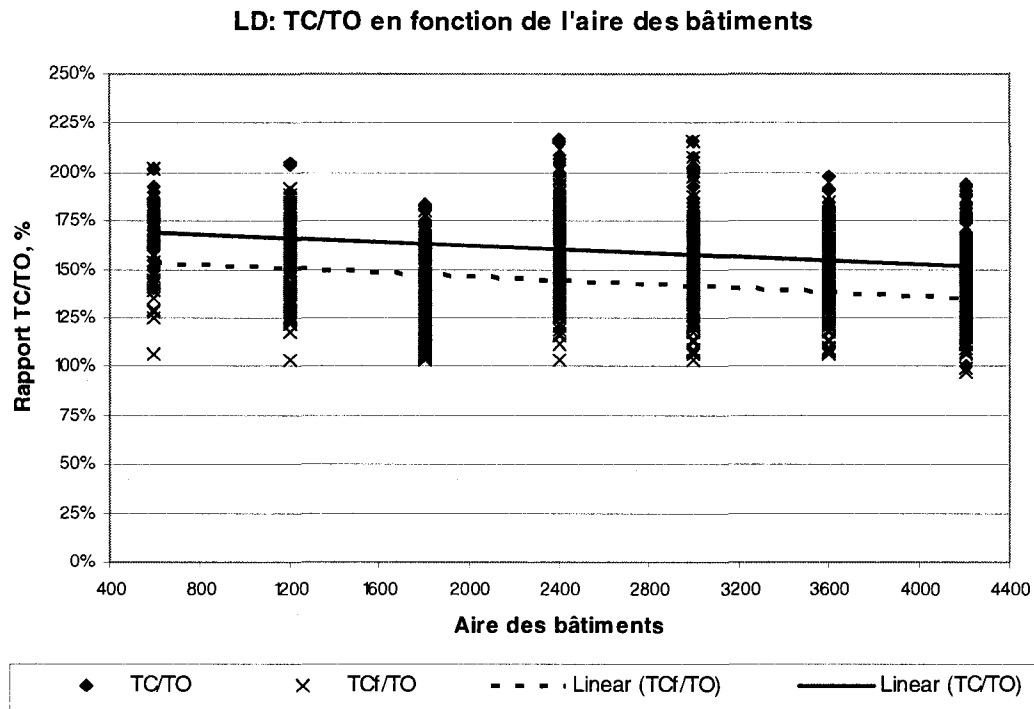


Figure 3-13 : Rapport des efforts tranchants au toit (V_u) pour les contreventements type TC

3.9 Profilés les plus récurrents

En plus de démontrer un avantage à introduire un fusible aux diagonales de contreventement travaillant en tension-compression, l'étude paramétrique avait pour objectif de fournir des informations pour orienter le programme expérimental. Dans les sections précédentes, nous avons démontré que l'ajout d'un fusible pourrait s'avérer une solution envisageable pour les contreventements travaillant en tension-compression. Les résultats contenus à cette section ne traitent donc que des contreventements travaillant en tension-compression.

Le Tableau 3-9 présente les profilés les plus récurrents.

Réurrence	Profilé
540	HSS101.6X101.6X6.4
401	HSS114.3X114.3X6.4
336	HSS88.9X88.9X4.8
270	HSS88.9X88.9X6.4
174	HSS127X127X6.4
126	HSS76.2X76.2X4.8
73	HSS101.6X101.6X4.8
64	HSS127X127X7.9
48	HSS139.7X139.7X7.9
33	HSS63.5X63.5X4.8
21	HSS63.5X63.5X3.2
16	HSS152.4X152.4X7.9
10	HSS57.2X57.2X3.2
Σ	2,112

Tableau 3-9 : Réurrence des profilés

Les résultats présentés au Tableau 3-9 indiquent la réurrence des profilés tubulaires pour les bâtiments dont le SRFS est constitué de contreventements travaillant en tension-compression (TC-MD et TC-LD).

Il est à noter que les résultats présentés au Tableau 3-9 sont les résultats obtenus de l'analyse paramétrique décrite dans le chapitre. Cette étude a été précédée d'une étude paramétrique préliminaire portant sur des ensembles de bâtiments différents. Dans les premières analyses, le profilé HSS114x114x6.4 était le profilé le plus récurrent, suivi par le profilé HSS127x127x6.4 et du HSS102x102x4.8. Nous avons par la suite révisé certains paramètres, dont la géométrie des bâtiments considérés, afin de présenter des bâtiments plus probables. Par contre, entre le moment des analyses préliminaires et le raffinement de l'étude paramétrique, nous avons amorcé les essais expérimentaux

suivant les premiers profilés. Les essais réalisés sur les fusibles ajoutés aux profilés tubulaires (programme expérimental no.2) a été réalisé suivant les résultats présentés à cette section.

La Figure 3-14 présente la distribution des résultats en fonction du rapport d'élancement. La ligne pleine contenue sur cette figure correspond à la distribution pour toutes les diagonales. Le tracé pointillé correspond aux résultats obtenus pour le profilé tubulaire le plus récurrent (HSS102x102x6.4) et qui a été utilisé pour le deuxième programme expérimental.

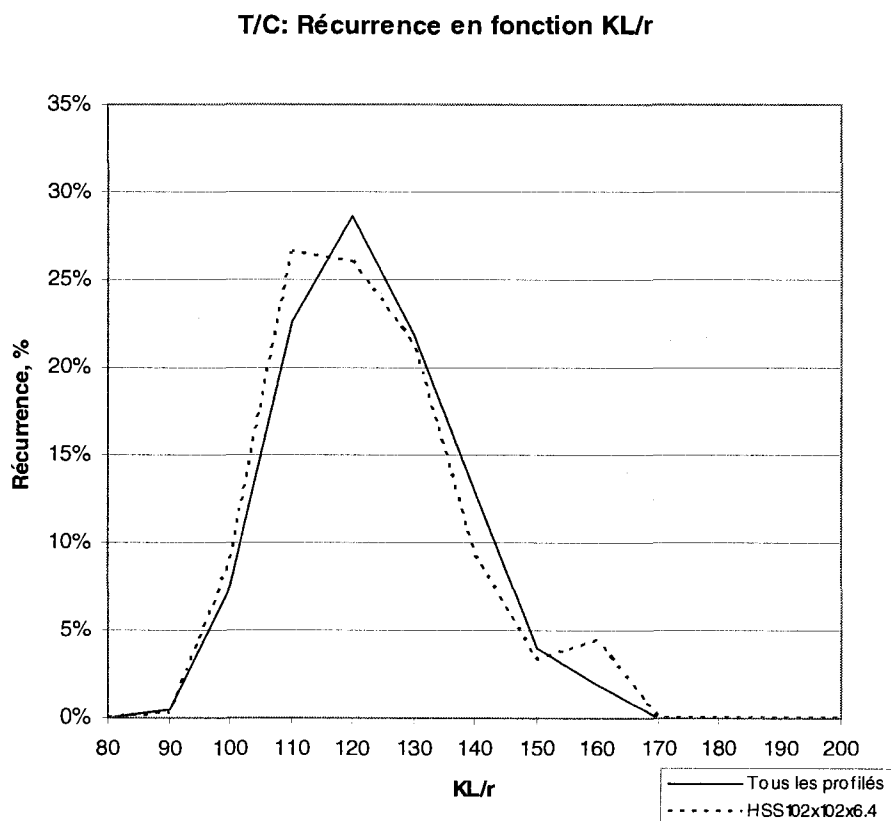


Figure 3-14 : Distribution des résultats en fonction du rapport d'élancement (KL/r)

3.10 Discussions

Deux principaux objectifs étaient visés lorsque nous avons entrepris l'élaboration de l'étude paramétrique.

Dans un premier temps, nous voulions identifier le potentiel d'économie pouvant être envisagé par l'ajout de fusibles. Les résultats ont démontré que l'ajout de fusibles aux contreventements travaillant en tension-compression présente un potentiel d'économie important pour tous les assemblages et toutes les composantes structurales adjacentes (poutres, poteaux et tablier métallique). Par contre, l'ajout des fusibles aux contreventements travaillant en tension seulement ne présente aucun potentiel d'économie. Nous n'avons pas présenté les résultats puisque ces conclusions peuvent être théoriquement expliquées. Ainsi, puisque les profilés formant les diagonales sont choisis en fonction de la charge de tension, il n'est pas possible de réduire cette résistance, à moins que les facteurs b/t gouvernent le choix du profilé. De plus, dans l'éventualité qu'un fusible soit ajouté, il pourrait même s'avérer pénalisant en raison du facteur d'écrouissage (R_{SH}) qui augmente la force (de 1.5 pour l'étude paramétrique).

Nous voulions aussi vérifier quel système de résistance au charge sismique était le plus économique. Nous avons ainsi procédé à des analyses utilisant des contreventements travaillant en tension-compression et en tension seulement suivant des conceptions à ductilité modérée (MD), à ductilité limitée (LD) et suivant la construction conventionnelle (CC). Les résultats obtenus indiquent que l'ajout de fusibles aux contreventements travaillant en tension-compression de type MD et LD sont des solutions plus économiques en comparaison aux contreventements conçus suivant les prescriptions de la construction conventionnelle. Par contre, nous avons aussi démontré que les contreventements travaillant en tension seulement sont en fait l'approche la plus économique, et ce, que les contreventements travaillant en tension-compression aient un fusible ou pas.

Malgré que les contreventements travaillant en tension seulement sans fusible soit la solution la plus économique, nous voulions tout de même présenter une conception de fusible pour les contreventements travaillant en tension-compression. Ainsi, le deuxième objectif suivi lors de l'élaboration de l'étude paramétrique était d'orienter les essais expérimentaux. Grâce aux résultats obtenus, nous avons pu identifier le profilé tubulaire et le rapport d'élancement le plus récurrent, et ce, afin de recréer, le plus fidèlement possible, ces conditions dans le programme expérimental.

CHAPITRE 4 – PROGRAMME EXPÉRIMENTAL 1 – CORNIÈRES

4.1 Introduction

Les essais ont été séparés en deux programmes. Le premier programme, qui est décrit dans ce chapitre, nous a permis d'étudier le comportement du fusible. Le deuxième programme visait à étudier le comportement du fusible lorsque introduit à une diagonale de contreventement.

Dans les prochains paragraphes, nous présenterons nos objectifs et motivations à entreprendre l'étude du fusible, nous décrirons le concept des fusibles, la méthode de conception des fusibles, le montage des essais, l'instrumentation utilisée et les résultats obtenus.

4.2 Objectifs

Ce programme expérimental est une étape intermédiaire importante qui vise à définir un fusible et à étudier son comportement individuel et ce, dans le but de l'introduire, éventuellement, à une diagonale de contreventement. En introduisant un fusible à une diagonale de contreventement, le comportement global de la diagonale est inévitablement modifié. Afin de bien comprendre les modifications de comportement engendrées par l'ajout d'un fusible, nous devons préalablement bien comprendre le comportement individuel des composantes formant les diagonales.

Le comportement des profilés tubulaires formant des diagonales est bien connu et a fait l'objet de plusieurs recherches. D'ailleurs, les prescriptions de la norme S16, notamment quant aux limitations des rapports d'élancement et des rapports b/t proviennent de résultats obtenus de ces travaux de recherches antérieurs.

Cependant, le comportement des composantes formant le fusible n'est pas connu. Bien que les fusibles soient formés d'acier, et que les propriétés de ce matériau soient bien définies, il est malgré tout, difficile de prévoir le comportement des fusibles en raison de leur géométrie particulière.

4.3 Choix (justification) et conception des spécimens

Afin de concevoir des fusibles représentatifs de ceux pouvant être obtenus dans un bâtiment, nous utiliserons les résultats obtenus de l'étude paramétrique. Cette dernière nous informe des profilés les plus récurrents et de l'aire minimale des fusibles. À partir de ces résultats, l'objectif est de présenter une géométrie de fusible simple à concevoir, simple à réaliser et peu coûteuse. Par ces critères, nous espérons que cette méthode de concevoir les diagonales de contreventements deviendra une solution économique attrayante et adoptée par la pratique.

L'introduction d'un fusible aux diagonales de contreventement a fait l'objet de plusieurs recherches. En considérant les conclusions de ces dernières, nous avons décidé d'étudier l'approche de fusibles travaillant en traction formés de l'arrangement de quatre (4) cornières. La Figure 4-1 présente le croquis du fusible proposé.

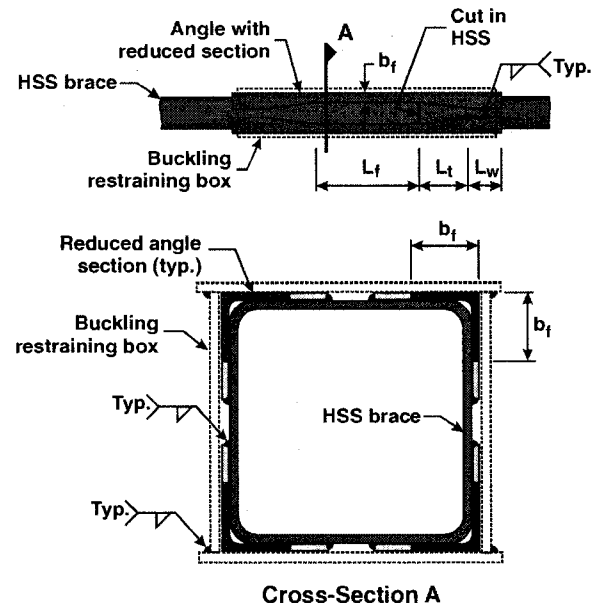


Figure 4-1 : Géométrie du fusible envisagé

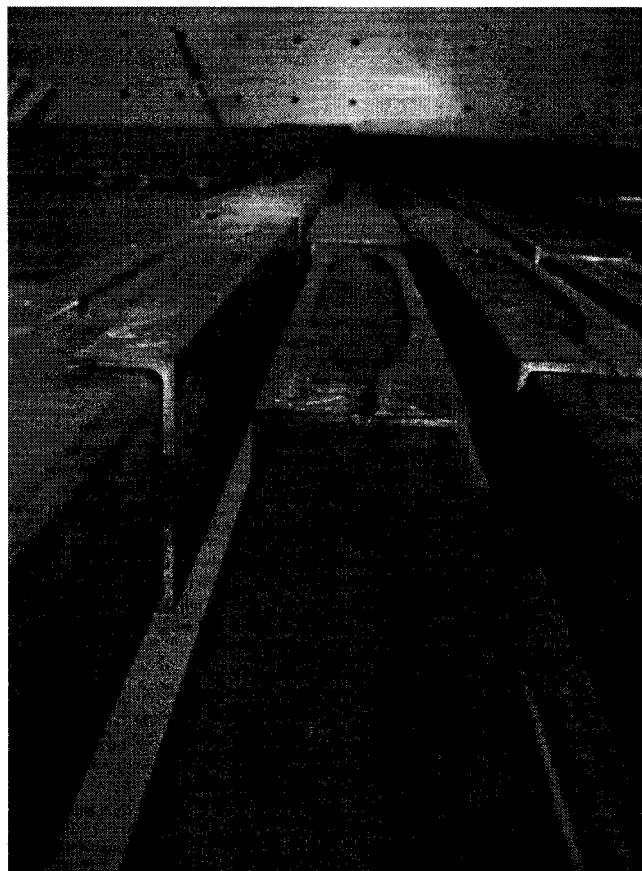


Figure 4-2 : Fusible envisagé

Le profilé tubulaire le plus récurrent, suivant l'étude paramétrique, est le HSS114x114x6.4. Lainco inc., qui a fourni les spécimens, nous a confirmé que le HSS114 était aussi le profilé répondant le plus souvent à ses besoins. Par contre, Lainco a indiqué qu'il était plus économique de choisir un autre profilé étant donné que le HSS114 ne pouvait être obtenu que par le biais de commandes spéciales. Par conséquent, et par soucis de présenter des résultats pouvant englober une majorité de cas rencontrés en pratique, nous avons décidé, à cette étape de la recherche, d'utiliser le 2^e profilé le plus récurrent, soit un HSS127x127x6.4. De plus, toujours selon l'étude paramétrique, le rapport d'élancement (KL/r) pour lequel les économies sont les plus importantes était de 110 pour ce profilé. Par conséquent, il est à notre avantage de

recréer ces conditions en laboratoire afin de démontrer la portée des économies pouvant être envisagée.

Afin de définir une géométrie de fusibles, nous devons à cette étape, choisir une géométrie préliminaire de cadre pour lequel le HSS127x127x6.4 a un rapport d'élancement d'environ 110. À partir de ces données, nous pouvons indiquer que la longueur de la diagonale, pour un contreventement en X, doit être de 10.8m, tel que présenté à l'Equation 4-1.

Equation 4-1

$$K = 0.5$$

$$r_{\text{HSS127x127x6.4}} = 49.1\text{mm}$$

$$\frac{KL}{r} = 110$$

$$L = \frac{110r}{K} = \frac{110 \times 49.1}{0.5} = 10,802\text{mm}$$

En considérant un espacement de 9 m entre les poteaux, et afin d'avoir une diagonale mesurant 10.8 m, nous devons considérer une hauteur de 6m. Malheureusement, un cadre ayant une géométrie de 9 m x 5.97 m dépasse les limites du cadre d'essai.

Cependant, des recherches antérieures ont démontré que le flambement des diagonales en X survient seulement dans une demie diagonale⁴. Nous avons ainsi décidé de ne reproduire au laboratoire qu'une demie diagonale. De plus, nous avons été informés qu'un autre projet pourrait faire usage du cadre d'essai simultanément et que les essais de ce 2^e projet requièrent une hauteur de cadre de 3.75m. Par soucis

⁴ Seismic Response of Concentrically Braced Steel Frames Made with Rectangular Hollow Bracing Members, Journal of Structural Engineering, R. Tremblay, M. H. Archambault, A. Filiatrault, 2003.

d'adopter une méthode de travail efficace qui réduirait les travaux nécessaires aux changements de géométrie du cadre, nous voulions tenter d'harmoniser la géométrie des deux projets. Ainsi en supposant une hauteur de 3.75m, les propriétés du cadre sont révisées comme présentées à l'Equation 4-2.

Equation 4-2

$$K = 1.0$$

$$r = 49.1mm$$

$$H = 3750mm$$

$$\frac{KL'_{dia}}{r} = 110$$

$$L'_{dia} = 0.8L_{dia}$$

$$L_{dia} = \frac{110 \times 49.1}{1.0 \times 0.8} = 6,751.25mm$$

$$L = \sqrt{L_{dia}^2 - H^2} = 5614mm$$

Les propriétés de la diagonale en sont modifiées tel que montré à l'Equation 4-3.

Equation 4-3

$$K = 1.0$$

$$r = 49.1mm$$

$$H = 3750mm$$

$$L = 6000mm$$

$$L_{dia} = 7075.5mm$$

$$L'_{dia} = 0.8L_{dia} = 5660.39mm$$

$$\frac{KL'_{dia}}{r} = 115$$

4.4 Description des cornières

Pour une géométrie de cadre soumise aux conditions mentionnées plus haut, l'étude paramétrique indique les conditions auxquelles les cornières doivent se soumettre. Le Tableau 4-1 résume ces conditions particulières.

C_r :	Résistance de la membrure en compression	292kN
$C_{u,a}$:	Résistance ultime de l'assemblage en compression	398kN
A_F :	Aire requise pour la section du fusible	1768mm ²
$T_{r,F}$:	Résistance en traction du fusible	478kN
$T_{u,a,F}$:	Résistance ultime en traction du fusible	584kN
β :	Potentiel d'économie (%)	43%

Tableau 4-1 : Résultats obtenus de l'étude paramétrique pour la conception des cornières

Le fusible envisagé est formé par l'agencement de quatre (4) cornières. Nous supposons que les cornières sont des L51x51x6.4 ayant des propriétés géométriques suivantes :

Aire :	605mm ²
I :	0.145×10 ⁶ mm ⁴
S :	4.04×10 ³ mm ³
r :	15.5mm

Pour ce dimensionnement préliminaire, l'aire du fusible doit être d'au moins 1768mm². Par conséquent, l'aire de chacune des cornières formant le fusible doit être d'au moins :

$$A_F = \frac{1768}{4} = 442\text{mm}^2$$

Puisque l'aire des cornières est plus élevée que l'aire requise pour le fusible, nous

pouvons réduire la section des cornières, et ce, en réduisant la largeur des ailes de 51mm à 38mm. L'aire de la section centrale est ainsi réduite à 451mm². La Figure 4-3 présente la géométrie de l'une des quatre (4) cornières.

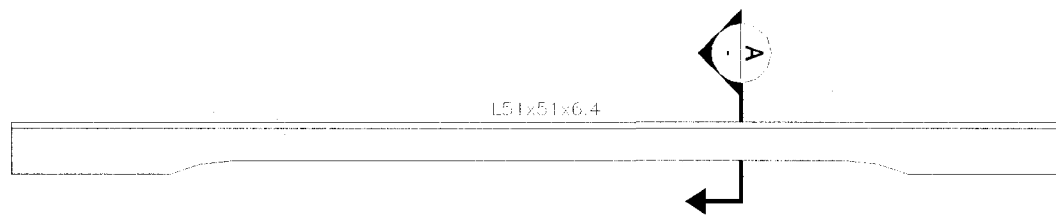


Figure 4-3 : Géométrie des cornières

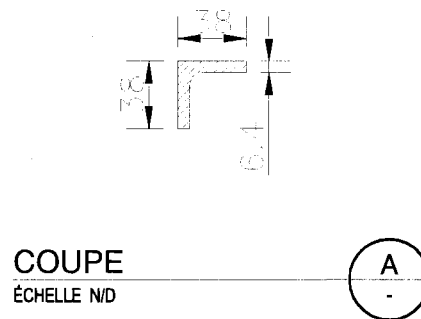


Figure 4-4 : Coupe A

Chacune des cornières formant le fusible est indépendante, ce qui nous permet de concentrer nos études que sur l'analyse d'une cornière plutôt que sur l'agencement de quatre cornières.

Plutôt que de choisir une cornière ayant exactement l'aire requise, dans ce cas $L38 \times 38 \times 6.4 (A = A_F)$, nous avons plutôt choisi une cornière plus imposante, $L51 \times 51 \times 6.4$, pour laquelle nous avons réduit sa section. Deux raisons expliquent cette

modification. Dans un premier temps, nous voulons que la plastification du fusible soit constante sur toute sa longueur. Puisque l'assemblage de la cornière au profilé tubulaire est assuré par des cordons de soudure, et que ces derniers altèrent localement les propriétés de l'acier, nous voulons nous assurer que le comportement plastique du fusible n'en soit pas altéré et que la rupture de la cornière se produise dans la section réduite plutôt qu'à la jonction de l'assemblage. Deuxièmement, les propriétés de l'acier peuvent différer d'une coulée à l'autre notamment quant à la contrainte limite élastique et quant à la contrainte de rupture. Afin d'assurer une cohérence dans les résultats, nous avons commandé une quantité de suffisante de cornières pour la réalisation de tous les essais et ce, en nous assurant que les propriétés de l'acier soient constantes. Puisque la géométrie du cadre et la sélection du profilé tubulaire sont des choix préliminaires pour le premier programme expérimental, nous voulons nous assurer de pouvoir modifier la section réduite selon le choix final et ce, sans pour autant altérer les propriétés de l'acier.

4.4.1 Zone de transition

Lors de la conception des cornières, une attention particulière doit être portée à la zone de transition qui se situe entre la section réduite de la cornière et sa section originale. Une transition abrupte produirait une concentration locale de contraintes, qui se solderait par une rupture prématurée de la cornière. Ainsi, nous devons faire en sorte que les forces puissent migrer entre les deux sections sans produire de rupture. De cette manière, nous pourrions compter sur un comportement plastique constant sur toute la longueur du fusible et nous assurer que la rupture aura lieu dans le fusible.

Pour y parvenir, nous avons procédé à une modélisation linéaire par ADINA d'une cornière. Le modèle comprenait une aile d'une cornière présentée avec des éléments de plaques que nous avons soumis à des efforts axiaux en traction. Afin de valider la zone de transition, nous avons élaboré cinq modèles pour lesquels, nous avons fait varier le rayon de l'arc produisant la zone de transition.

La Figure 4-5 présente une vue générale du modèle.

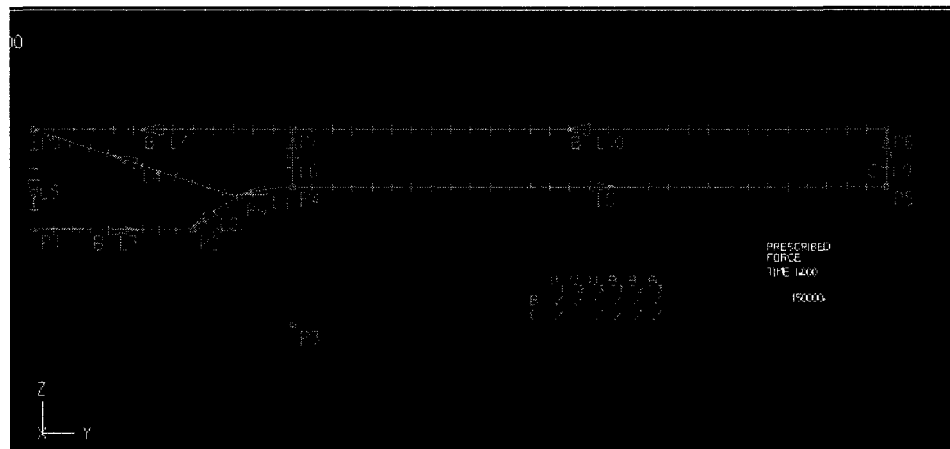


Figure 4-5 : Vue générale du modèle

Le Tableau 4-2 présente les différents rayons que nous avons envisagés.

Modèle	Rayon
I	80
II	96
III	40
IV	60
V	70

Tableau 4-2 : Rayons modélisés

Dans les sections qui suivent, nous vous présenterons les résultats en montrant la distribution des contraintes.

4.4.1.1 Modèle I – 80 mm

La Figure 4-6 présente la distribution des contraintes du modèle I.

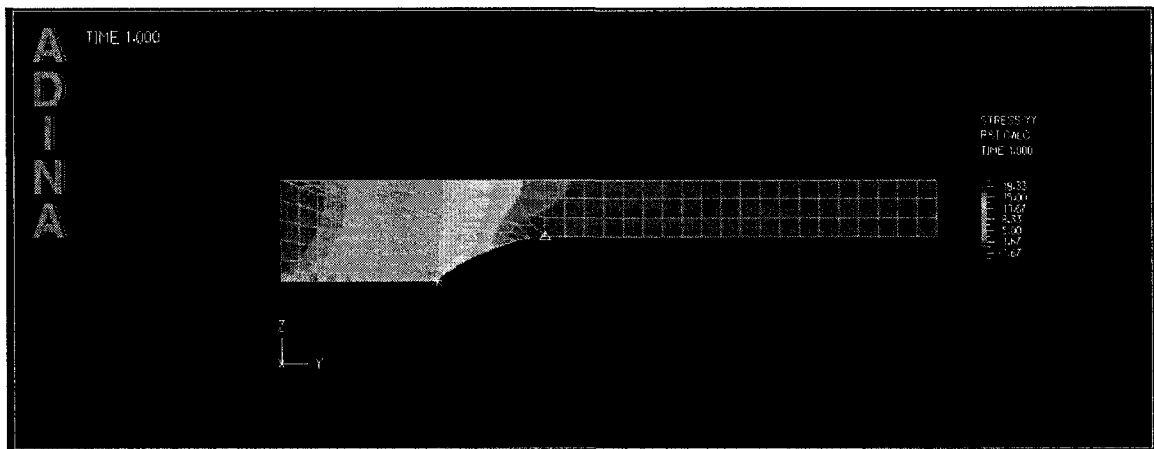


Figure 4-6 : Modèle I: rayon de 80mm

Cette distribution est acceptable, puisque l'assemblage et la zone de transition sont moins sollicités que la section réduite. Par conséquent, et tel qu'espéré, nous pouvons prévoir une rupture dans la zone du fusible. Bien qu'adéquate, nous avons néanmoins fait varier le rayon de la zone de transition afin de l'optimiser.

4.4.1.2 Modèle II – 96 mm

La Figure 4-7 présente la distribution des contraintes du modèle II.

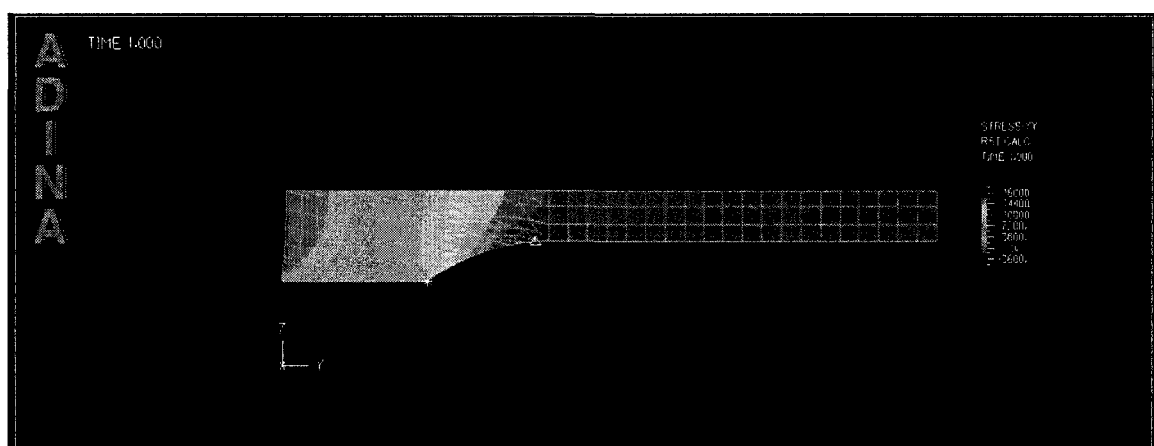


Figure 4-7 : Modèle II: rayon de 96mm

Ce modèle présente la même distribution que le modèle précédent, ce qui indique qu'il n'y a aucun avantage à augmenter la longueur de la zone de transition. Nous tenterons plutôt de la réduire et ainsi, réduire la longueur des cornières.

4.4.1.3 Modèle III – 40 mm

La Figure 4-8 présente la distribution des contraintes du modèle III.

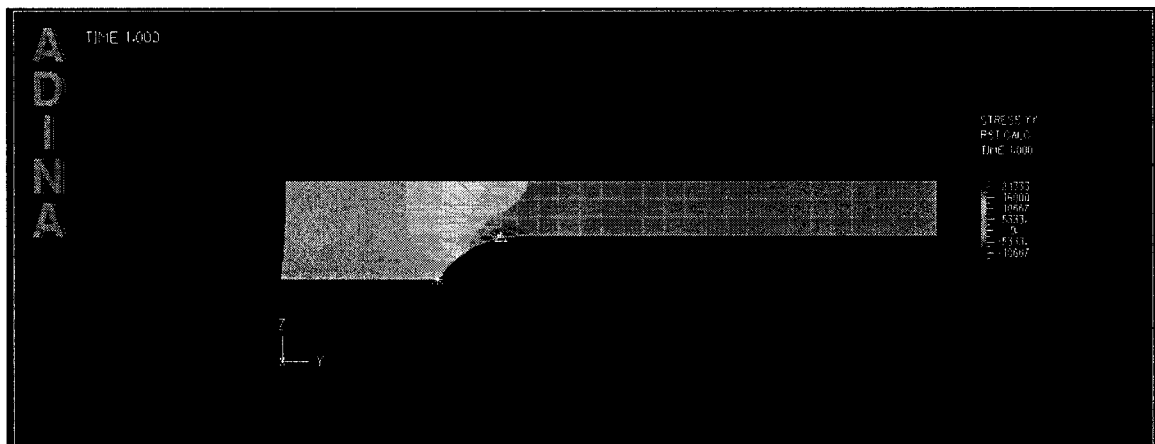


Figure 4-8 : Modèle III: rayon de 40 mm

Un rayon de 40 mm pour la zone de transition produira une rupture prématurée dans la zone de transition avant que la zone du fusible soit entièrement sollicitée. Tel que présenté précédemment, nous voulons éviter cette éventualité. Par conséquent, à ce moment de notre investigation, nous pouvons croire que la zone de transition optimale aura un rayon entre 40mm et 80mm.

4.4.1.4 Modèle IV – 60 mm

La Figure 4-9 présente la distribution des contraintes du modèle IV.

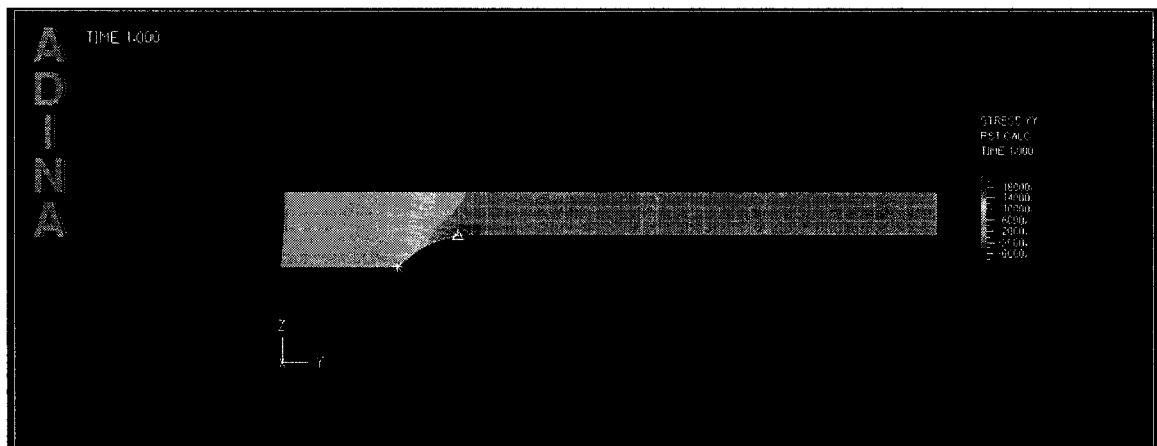


Figure 4-9 : Modèle IV: rayon de 60mm

Comme pour le modèle précédent, on remarque qu'une rupture par concentration de contraintes se produira dans l'arc de la zone de transition, ce qui est inacceptable.

4.4.1.5 Modèle V – 70 mm

La Figure 4-10 présente la distribution des contraintes du modèle V.

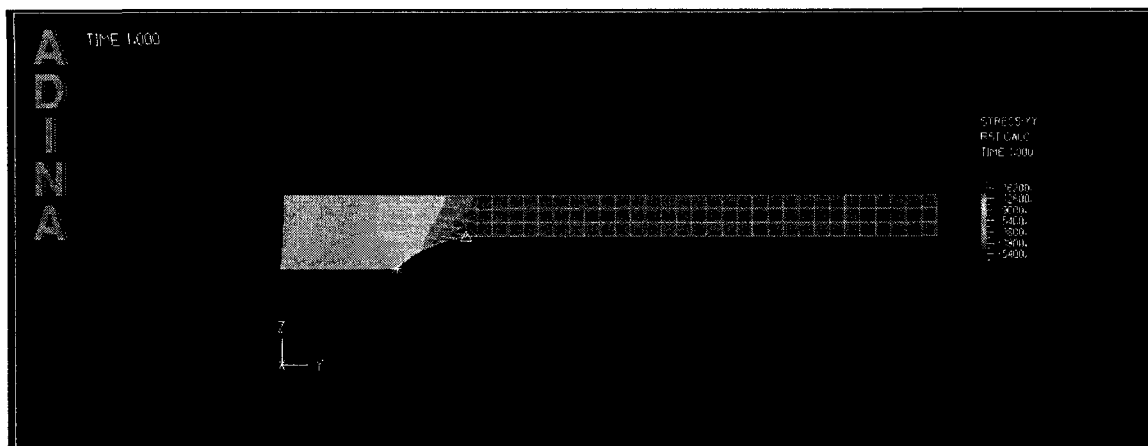


Figure 4-10 : Modèle IV: rayon de 70mm

Les contraintes dans le fusible sont plus élevées que les contraintes dans la zone de transition et dans la zone de l'assemblage de la cornière au profilé tubulaire. Par conséquent, nous pouvons supposer que la rupture aura lieu dans le fusible suivant un comportement plastique uniforme de ce dernier.

Nous avons considéré cette configuration pour le premier programme expérimental.

4.5 Description des essais

Comme nous le mentionnions précédemment, le premier programme expérimental vise à déterminer le comportement du fusible avant qu'il ne soit introduit à la diagonale de contreventement.

Notre intérêt pour le comportement du fusible en compression est moindre, puisque dans sa conception, nous supposons que sa résistance en compression est plus élevée que celle de la diagonale. Par conséquent, une rupture due à la compression ne devrait pas se produire dans le fusible lorsque introduit à la diagonale.

Selon nos hypothèses, pour une diagonale à laquelle un fusible est ajouté, la rupture

doit se produire en traction dans la section du fusible. Par conséquent, nous avons étudié le comportement du fusible lorsqu'il est soumis à une charge en traction.

Le fusible suggéré est simple à réaliser, et le modèle par éléments finis indique que le comportement du fusible sera adéquat, sans fracture prématurée dans la zone de transition due à une concentration de contraintes.

Cependant, par leur géométrie non-linéaire, il est difficile de prédire le comportement plastique des cornières. Le modèle par éléments finis nous permet de croire que leur comportement sera adéquat, et ce par l'extrapolation du comportement des fusibles dans leur mode élastique. Cependant sans un modèle par éléments finis plus élaboré et sans essais expérimentaux, nous ne pouvons garantir le bon comportement plastique du fusible.

Nous avons préféré poursuivre notre étude en suivant une approche expérimentale. Ainsi, dans l'éventualité que ces fusibles soient adoptés par la pratique, nous pensons que la réduction de la longueur des ailes des cornières formant le fusible, sera, dans la majorité des cas, réalisée par une découpe au chalumeau directement à l'atelier du fournisseur d'acier. Suivant cette hypothèse, il est raisonnable de penser que la découpe produira des contraintes résiduelles qui peuvent difficilement être simulées par un modèle. De plus, cette procédure de découpe produira inévitablement des défauts de rectitudes locales qui affectent le comportement général du fusible. Ces défauts sont, eux aussi, très laborieux à représenter dans un modèle par éléments finis.

Dans ce programme expérimental, nous entreprendrons des essais de traction monotonique sur des cornières à sections réduites.

Par ces essais, nous pourrions confirmer :

- Si la géométrie, telle que décrite précédemment, permet un acheminement adéquat des contraintes au travers des zones de transitions;

- Si la plastification du fusible est constante sur toute sa longueur.

Nous étudierons aussi le comportement de la plastification pour différentes longueurs de fusibles, et ce, afin de déterminer l'ampleur des déformations plastiques. Finalement, nous avons déterminé les conséquences attribuables aux défauts engendrés par les méthodes de découpe en procédant à des essais sur des spécimens pour lesquels la géométrie a été obtenue par usinage, un procédé plus précis que la coupe au chalumeau.

4.6 Liste des essais

Le premier programme expérimental visait à déterminer à la fois les propriétés de l'acier utilisé et le comportement d'une cornière ayant la géométrie du fusible. Cette section résume les essais qui ont été entrepris dans ce premier programme.

4.6.1 Éprouvette d'acier

Les propriétés de l'acier seront obtenues à partir d'essais en traction suivant les prescriptions de la norme ASTM-E8. Cette norme impose une géométrie précise et très restrictive. La Figure 4-11 présente la géométrie des éprouvettes. Ces essais nous permettront d'obtenir une courbe contrainte-déformation de référence fiable.

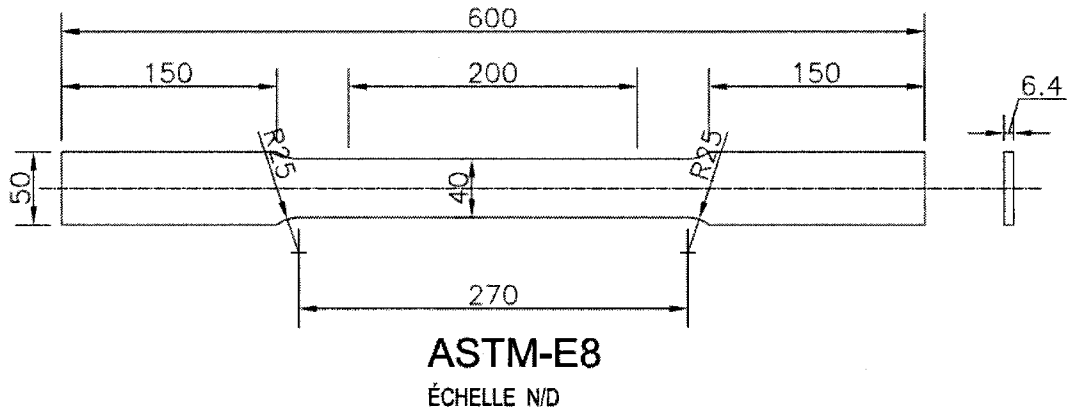


Figure 4-11 : Éprouvette d'acier selon la norme ASTM-E8

Les courbes contraintes-déformations obtenue de ces essais seront des valeurs de comparaisons nous permettant de mieux comprendre le comportement du fusible. Il est à noter que ces éprouvettes sont découpées à partir des cornières formées de la même coulée d'acier.

Nous avons procédé à l'essai de trois (3) spécimens ayant la même géométrie.

4.6.2 Cornières

4.6.2.1 Essais initialement prévus

Afin de comprendre le comportement des cornières découpées conformément à la géométrie requise, nous procéderons à des essais en traction. En plus de déterminer la contrainte limite élastique, la contrainte de rupture, et le taux de déformations, ces essais nous permettront de statuer sur la migration des contraintes dans la zone de transition.

Puisque le taux de déformation est directement proportionnel à longueur du fusible, nous procéderons à des essais en faisant varier la longueur du fusible. Nous procéderons ainsi à trois (3) essais sur des cornières dont la section réduite s'étend sur une longueur de 300mm, trois (3) essais sur des cornières dont la section réduite s'étend sur 600mm et trois (3) essais sur des cornières dont la section réduite s'étend sur 1087mm. Il est à noter que la longueur de 1087mm est choisie en fonction de la longueur maximale permise par l'équipement du laboratoire.

Finalement, afin de mieux comprendre les conséquences engendrées par les découpes au chalumeau, nous avons réalisé trois (3) essais sur des cornières dont leur section réduite a été obtenue par usinage.

Le Tableau 4-3 résume les essais qui seront entrepris.

Essai	Description	Quantité
1	Éprouvette d'acier - ASTM-E8.	3
2	Cornière d'acier dont l'aile est réduite de 51 à 38 mm sur une longueur de 300 mm. Découpe réalisée au chalumeau.	3
3	Cornière d'acier dont l'aile est réduite de 51 à 38mm sur une longueur de 600mm. Découpe réalisée au chalumeau.	3
4	Cornière d'acier dont l'aile est réduite de 51 à 38mm sur une longueur de 1087mm. Découpe réalisée au chalumeau.	3
5	Cornière d'acier dont l'aile est réduite de 51 à 38mm sur une longueur de 300mm. Cornière usinée.	3

Tableau 4-3 : Description des essais

4.6.2.2 Autres spécimens

Durant l'avancement de nos travaux, et suivant des discussions avec Lainco, nous avons convenu de procéder à des essais supplémentaires faisant varier le profilé des cornières et la section réduite des ailes des cornières. De cette manière, nous pouvions mieux comprendre le comportement des cornières à section réduite, et ainsi, davantage généraliser nos conclusions. Il est cependant à noter que ces spécimens ne proviennent pas des mêmes cornières que nous utilisons pour les essais en vue du

deuxième programme expérimental.

4.7 Montage des spécimens

La Figure 4-12 présente le montage adopté pour les essais en traction des cornières.

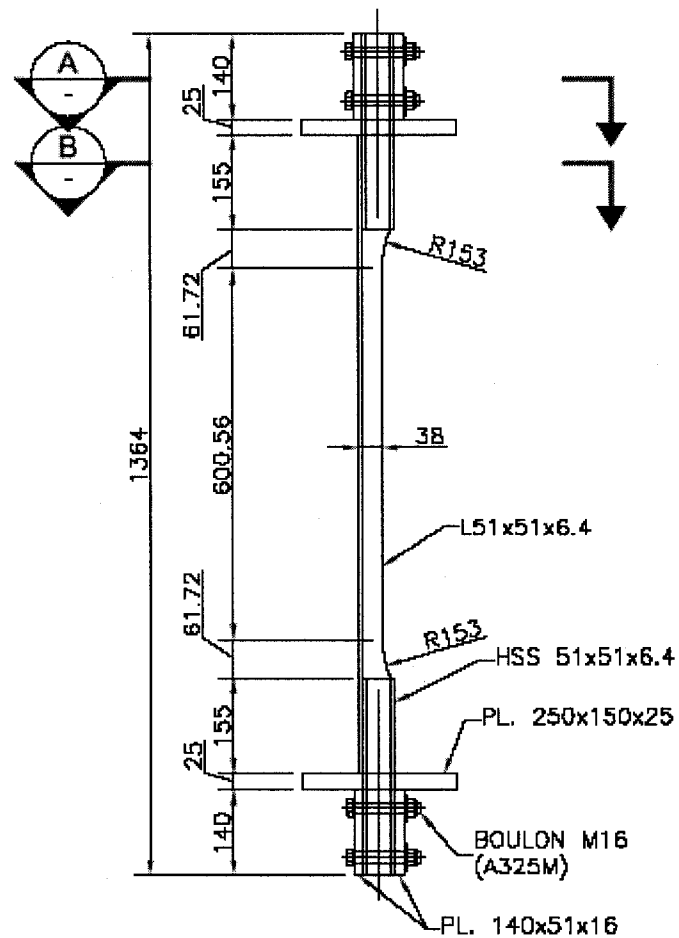


Figure 4-12 : Montage d'essai

La Figure 4-13 et la Figure 4-14 présentent, respectivement, les coupes A et B.

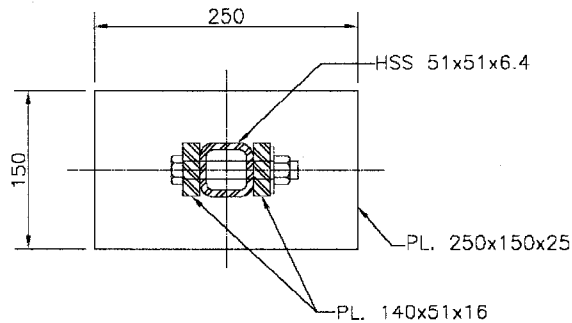


Figure 4-13 : Coupe A

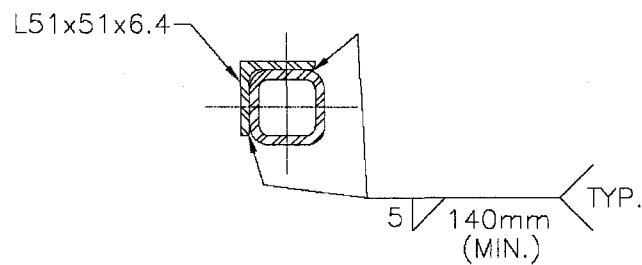


Figure 4-14 : Coupe B

Les cornières choisies sont des L51x51x6.4. Par conséquent, le profilé tubulaire auquel les cornières doivent se connecter doit pouvoir résister à la charge en traction suivante :

$$T_u = A_g F_u = \frac{451}{1000^2} \times 450 \times 10^3 = 202.95 \text{ kN}$$

$$\therefore T_u = 210 \text{ kN}$$

En plus de l'aire minimale, le profilé tubulaire choisi doit avoir une largeur supérieure d'au moins 5 mm par rapport à l'aile de la cornière pour permettre l'assemblage par soudure de ces 2 pièces.

Supposons un HSS51x51x6.4 dont la résistance en traction est donnée à l'Equation 4-4.

Il est à noter que nous présentons, dans ce document, que la version finale de nos calculs. Pour ainsi dire, nous avons, lors des calculs préliminaires, envisagés des profilés tubulaires moins lourds. Cependant, ces profilés ne permettaient pas un assemblage adéquat.

Equation 4-4

$$T_{r_{HSS}} = \phi A_g F_y = 0.9 \times \frac{1030}{1000^2} \times 345 \times 10^3 = 320kN \geq 210kN$$

4.8 Assemblages

4.8.1 Cornière au profilé tubulaire

Nous supposons une électrode de type E49XX et des filets de 5mm.

La résistance des soudures est donnée à l'Equation 4-5 et à l'Equation 4-6.

Equation 4-5

$$V_r = 0.67 \phi_w A_m F_u$$

$$V_r = 202 \times 10^3 \times A_m = 202 \times 10^3 \times \frac{2 \times b \times 6.4}{1000^2} = 210kN$$

$$\therefore b = 82mm$$

Equation 4-6

$$V_r = 0.67 \phi_w A_w X_u$$

$$210kN = \frac{0.778kN}{mm} \times 2 \text{ cordons} \times b$$

$$\therefore b = 140mm$$

Suivant les résultats obtenus des équations précédentes les cordons de soudure reliant la cornière au profilé tubulaire doivent être d'au moins 140mm.

4.8.2 Profilé tubulaire aux plaques

Nous supposons 2 boulons M16-A325M en double cisaillement.

4.8.2.1 Cisaillement

Les boulons sont en cisaillement double. L'Equation 4-7 présente la résistance du boulon.

Equation 4-7

$$V_r = 0.6\phi_m A_b F_u$$

$$A_b F_u = 2 \times 167 \text{ kN} = 334 \text{ kN}$$

$$V_r = 0.6 \times 0.67 \times 2 \times 334$$

$$V_r = 268 \text{ kN} \geq 210 \text{ kN}$$

4.8.2.2 Résistance à la pression diamétrale

L'Equation 4-8 présente la résistance à la pression diamétrale des deux boulons M16 – A325M

Equation 4-8

$$B_r = 3\phi_{br} t d n F_u$$

$$B_r = 3 \times 0.67 \times \frac{2 \times 6.4}{1000} \times \frac{16}{1000} \times 2 \times 450 \times 10^3$$

$$B_r = 370.48 \text{ kN} \geq 210 \text{ kN}$$

4.8.2.3 Résistance à la traction

Plaques sur les faces extérieures du profilé tubulaire

Equation 4-9

$$T_r = \phi A_g F_u$$

$$T_r = 0.9 \times \frac{51 \times 15}{1000^2} \times 300 \times 10^3 = 206.5 kN$$

$$T_r = 206 kN > 105 kN$$

Equation 4-10

$$T_r = 0.85 \phi A_n F_u$$

$$T_r = 0.85 \times 0.9 \times \frac{(51 - 20) \times 15}{1000^2} \times 450 \times 10^3 = 160.07 kN$$

$$T_r = 160 kN > 105 kN$$

Profilé tubulaire

Equation 4-11

$$T_r = 0.85 \phi A_{ne} F_u$$

$$A_n = 1030 - (2 \times 20 \times 6.4) = 774 mm^2$$

$$A_{ne} = 0.85 A_n = 657.9 mm^2$$

$$T_r = 0.85 \times 0.9 \times \frac{657.9}{1000^2} \times 450 \times 10^3 = 226.48 kN > 210 kN$$

4.8.2.4 Résistance à la flexion

Plaque déposée

Le moment de flexion générée sur la plaque est tel que donnée à l'Equation 4-12.

Equation 4-12

$$M_f = d \times F = 0.05m \times 105kN = 5.25kN \cdot m$$

$$M_r = \phi Z F_y$$

$$Z = \frac{bd^2}{4} = \frac{150 \times d^2}{4} = 37.5d_{\min}^2$$

$$M_f = 5.75 \leq M_r = 0.9 \times \frac{37.5d_{\min}^2}{1000^3} \times 300 \times 10^3$$

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{5.25 \times 1000^3}{0.9 \times 37.5 \times 300 \times 10^3}} = 22.78mm$$

$$d_{\min} = 1''$$

4.9 Procédure d'essais

Les essais ont été réalisés au laboratoire de l'École Polytechnique de Montréal dans la presse de traction ASMLER. Les essais du premier programme expérimental sont des essais en traction. En ce sens, une charge de traction croissante est appliquée jusqu'à la rupture.

4.9.1 Préparation des spécimens

Nous avons préparé et instrumenté les spécimens de manière à obtenir des données nous permettant de bien comprendre le comportement des cornières.

4.9.1.1 Installation de jauges

Des jauges ont été installées sur certains spécimens afin de mesurer l'élongation locale. Ainsi, nous pourrions évaluer l'élongation des spécimens à différentes localisations des spécimens.

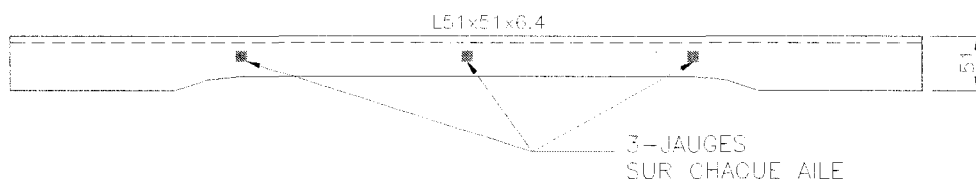


Figure 4-15 : Position des jauges

Pour deux spécimens, nous avons installé trois (3) paires de jauges tel que montré à la Figure 4-15, soit une jauge sur chacune des ailes à la sortie de la première zone de transition, une jauge sur chacune des ailes à la mi-longueur du fusible et une jauge sur chacune des ailes à la sortie de la deuxième zone de transition.

Suivant les premiers essais, nous avons remarqué que les élongations étaient les mêmes pour les paires de jauges placées au même niveau. Par conséquent, nous avons décidé de réduire à l'installation de deux (2) jauges en installant une jauge à la sortie d'une zone de transition et l'autre à mi-hauteur.

4.9.1.2 Peinture à la chaux

Afin de visualiser la migration des contraintes plastiques, nous avons peinturé les spécimens à la chaux. Cette méthode nous permet de visualiser les déformations durant l'essai, mais la peinture s'effritait sous l'impact produit à la rupture.

4.9.1.3 Mesurage des spécimens

Les jauges ne nous informent que localement sur l'élongation des spécimens. Puisque nous les avons installées à différentes localisations, nous ne pouvions qu'extrapoler le comportement entre chacune des jauges.

Néanmoins, afin de statuer si le comportement est adéquat et uniforme sur toute la longueur de la section réduite des cornières, nous avons mesuré la largeur des ailes.

Ainsi, nous avons mesuré, à l'aide d'un pied à coulisse, la largeur des ailes sur toute la longueur de chacun des spécimens et ce, à un intervalle de 20mm.

Comme nous mentionnions précédemment, la découpe des spécimens est réalisée au chalumeau, introduisant inévitablement des défauts de rectitudes. Ainsi, en mesurant la largeur des ailes à plusieurs endroits sur sa longueur, nous pouvons mieux comprendre et mieux prédire le comportement des spécimens à leur rupture. Puisque la résistance en traction de l'acier est directement proportionnelle à l'aire de la section, nous supposons que la rupture se produira au droit de la section la plus réduite.

4.9.1.4 Instrumentation

La presse ASMLER est branchée à un système d'acquisition qui enregistre la charge de traction en fonction de l'élongation du spécimen. La courbe de la force en fonction de l'élongation est tracée en temps réel sur le moniteur du système d'acquisition. Cette courbe est une information utile nous permettant de statuer du bon déroulement de l'essai.

Par contre, l'élongation tracée représente l'élongation totale du spécimen. Bien que la majorité des élongations se produisent sur la longueur de la section réduite, nous voulons pouvoir mesurer l'élongation de la section réduite. Pour y parvenir, nous avons installé un potentiomètre à corde qui enregistre l'élongation entre les deux (2) points d'intérêts.

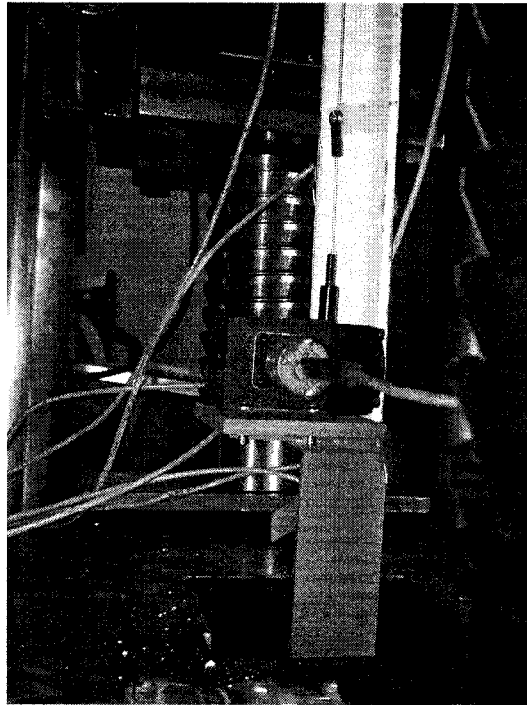


Figure 4-16 : Potentiomètre à corde

4.10 Résultats

4.10.1 Fusibles formés à partir de L51x51x6.4

Le Tableau 4-4 présente la numérotation des cornières utilisées dans ce programme expérimental.

Spécimen	Longueur fusible <i>mm</i>	Cornière	Nbs de jauges	P_y kN
1-1A	600	L51x51x6.4	6	156
2-3A	600	L51x51x6.4	3	157
3-2A	600	L51x51x6.4	3	161
4-1B	1087	L51x51x6.4	6	165
5-2B	1087	L51x51x6.4	3	158
6-3B	1087	L51x51x6.4	3	158
7-1C	300	L51x51x6.4	0	164
7-2C	300	L51x51x6.4	0	159
7-3C	300	L51x51x6.4	0	158
8-1D	300 ⁵	L51x51x6.4	0	157
8-2D	300 ¹	L51x51x6.4	0	157
8-3D	300 ¹	L51x51x6.4	0	157

Tableau 4-4 : Numérotation des spécimens

La Figure 4-17 présente le rapport P/P_y en fonction de la déformation pour tous les spécimens. La valeur P_y est prise arbitrairement en observant les graphiques de la charge en fonction du déplacement pour chacun des graphiques. Les valeurs P_y sont indiquées au Tableau 4-4.

⁵ Profilé usiné

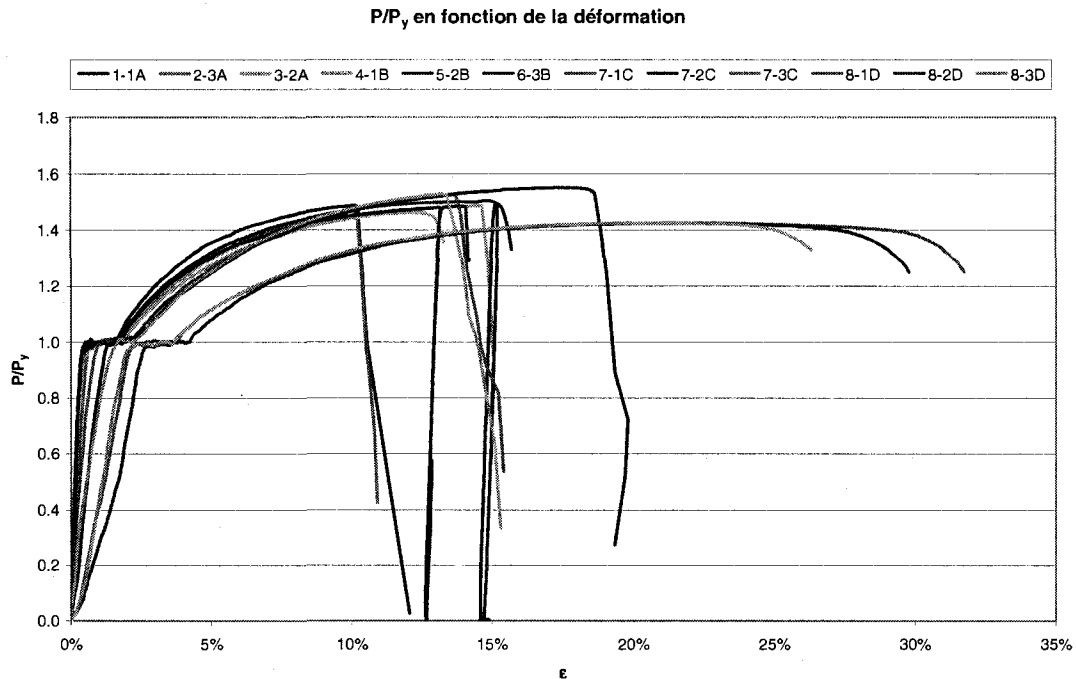


Figure 4-17 : P/P_y en fonction de la déformation pour tous les spécimens

Nous remarquons à la Figure 4-17 qu'il y a une différence entre les courbes des spécimens 1 à 6, les spécimens 7 et les spécimens 8.

Ainsi, en observant la Figure 4-18, nous remarquons que les spécimens 1 à 6 ont une courbe similaire. Ces spécimens ont tous été testés à l'été 2006. La pente de la courbe en mode élastique est similaire pour tous ces spécimens. Nous notons aussi qu'il y a un accroissement de résistance dû à l'écroutissage par un facteur de 1.5. La superposition des courbes nous assure ainsi que ces spécimens proviennent de la même coulée.

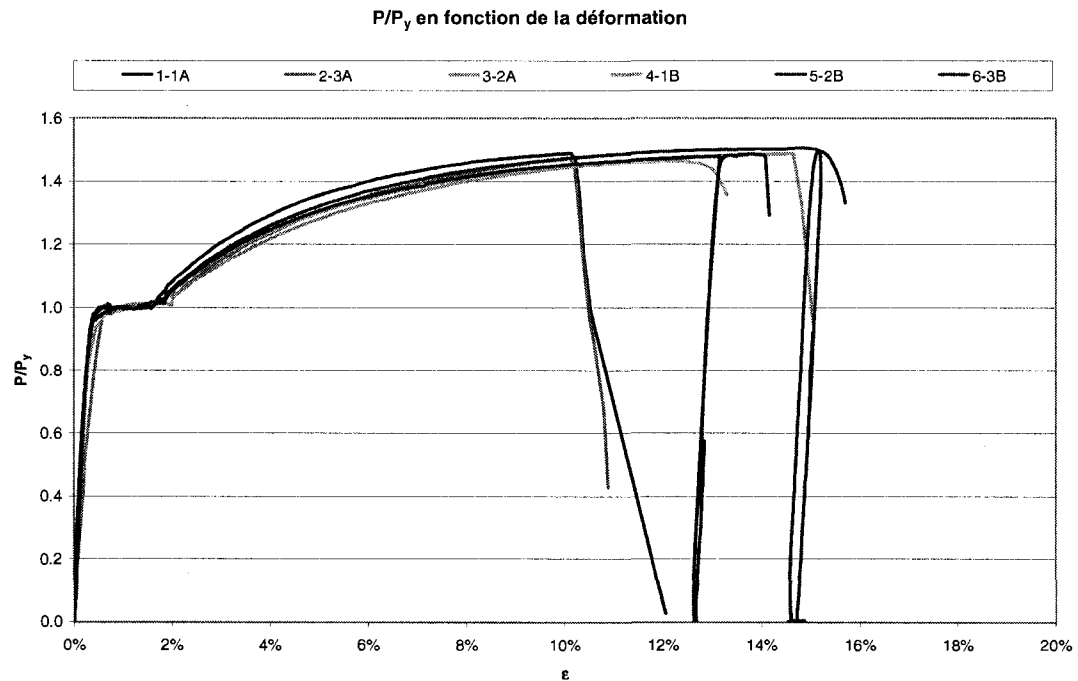


Figure 4-18 : P/P_y en fonction de la déformation pour les spécimens 1 à 6

Les spécimens 7 et 8 ont été testés après le deuxième programme expérimental. En effet, nous voulions élargir notre éventail de données après avoir terminé le deuxième programme expérimental. Cependant, nous remarquons que la pente des courbes dans leur mode élastique n'est pas similaire par rapport aux six premiers essais. Par contre, ces spécimens étant plus courts, nous avons dû utiliser une rallonge différente afin de fixer le potentiomètre à corde, ce qui aurait pourrait expliquer cette différence dans la pente de la droite élastique.

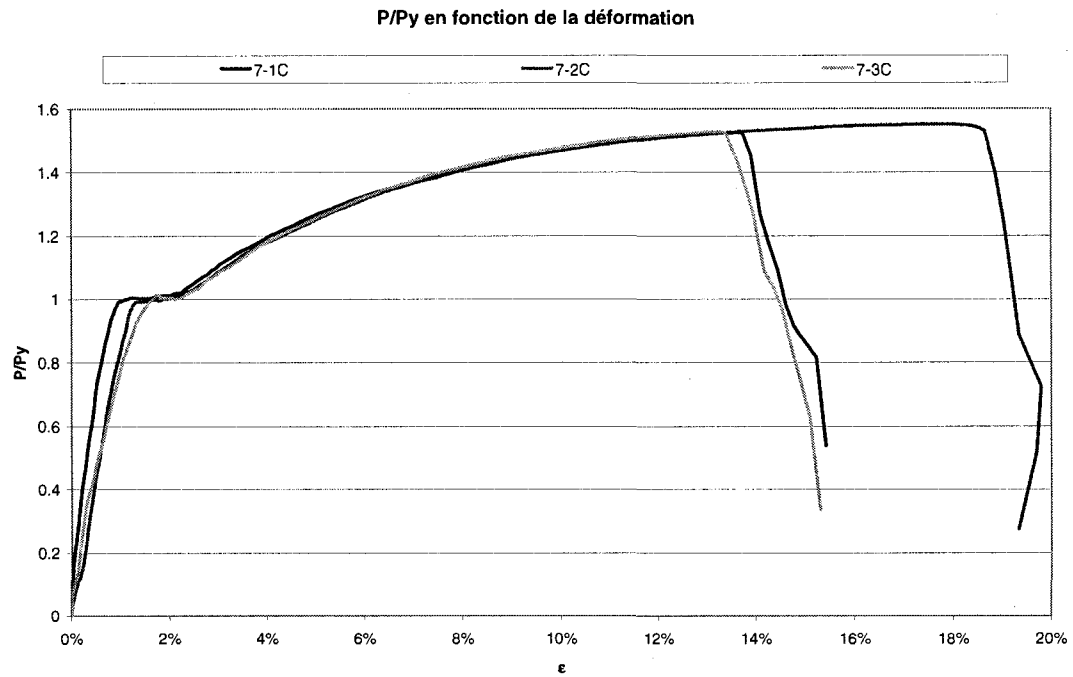


Figure 4-19 : P/P_y en fonction de la déformation pour les spécimens 7 et 8

Néanmoins, la Figure 4-19 présente la courbe du rapport P/P_y en fonction de l'élongation. Nous pouvons remarquer à ce graphique que l'écroutissage fournit une surrésistance par un facteur 1.5, ce qui est similaire aux spécimens 1 à 6. L'élongation est de l'ordre de 14% pour ces spécimens de 300mm.

Les spécimens 7 sont les spécimens de 300mm pour lesquels leur géométrie est obtenue à partir d'une découpe au chalumeau. Les spécimens 8 doivent leur géométrie à l'usinage qui fournit une découpe précise, sans altérer les propriétés de l'acier.

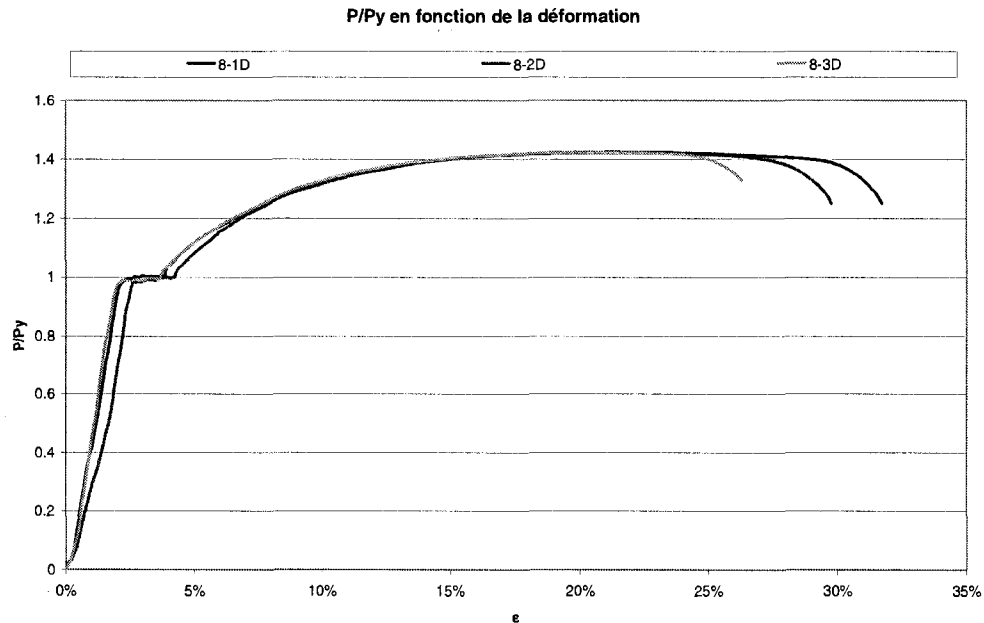


Figure 4-20 : P/P_y en fonction de la déformation pour les spécimens usinés

La Figure 4-20 présente la courbe du rapport P/P_y en fonction de l'élongation des spécimens usinés. L'élongation obtenue pour ces spécimens dépasse largement l'élongation des spécimens 7. De plus, nous remarquons que le facteur d'écrouissage est légèrement inférieur dans le cas des spécimens 8. Il est de 1.43 pour ces spécimens alors qu'il atteint 1.52 pour les spécimens similaires découpés au chalumeau.

Les spécimens usinés permettent une élongation plus prononcée par rapport aux spécimens découpés au chalumeau. En comparant ces courbes aux courbes de la Figure 4-21, nous remarquons que la méthode de découpe est directement liée à l'élongation des spécimens avant la rupture. Ainsi, les éprouvettes usinées conformément aux prescriptions de la norme ASTM-E8 ont des élongations rejoignant les élongations de la Figure 4-20 (spécimens usinés). Ainsi, nous expliquons cette situation en supposant que lorsque le spécimen est découpé au chalumeau, la striction

se produit uniquement à la section la plus réduite, alors que lorsque le spécimen est usiné, la striction se produit sur toute la section réduite qui est uniforme.

Bien que l'usinage puisse engendrer des coûts supplémentaires, l'avantage d'utiliser des fusibles usinés est qu'ils permettent de réduire le facteur d'écroutissage. Ainsi, à titre d'exemple, dans le cas que l'ingénieur travaille avec une elongation de 5% afin de déterminer la longueur du fusible, il devra considérer un facteur d'écroutissage de 1.3 dans le cas d'une découpe au chalumeau, et de 1.15 dans le cas d'un fusible usiné.

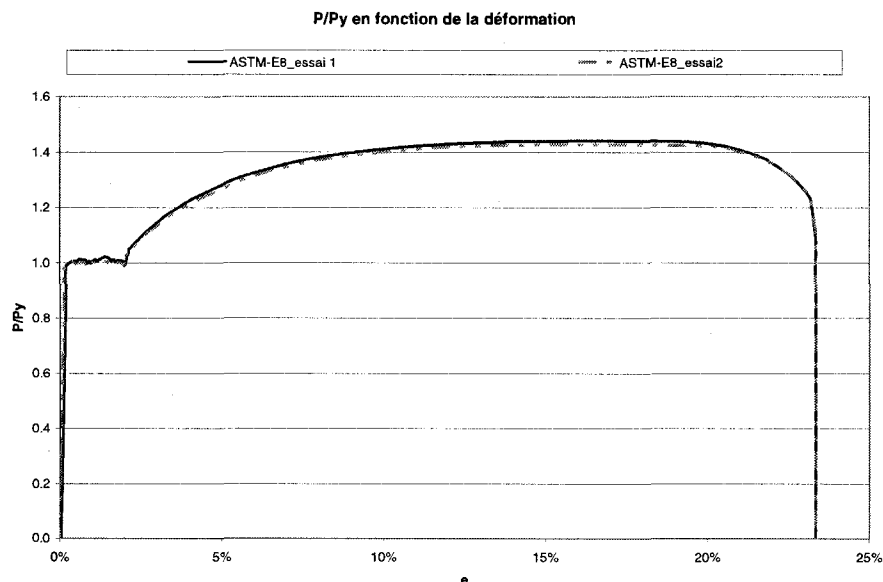


Figure 4-21 : P/P_y en fonction de la déformation pour les spécimens ASTM-E8

4.10.2 Autres spécimens

Nous avons aussi eu la chance d'augmenter notre éventail de données en procédant à des essais sur des spécimens proposés par Lainco. Trois géométries ont été proposées. Les cornières utilisées, le rayon de la zone de transition, et la réduction des ailes étant différents des premiers spécimens, nous ne pouvions faire de comparaisons au niveau des valeurs numériques obtenues. Par contre, ces essais peuvent, sans aucun doute, nous informer sur la généralisation des comportements globaux. Le Tableau 4-5 résume les propriétés des spécimens proposés.

Spécimen	Profilé	Quantité	Largueur	Longueur	
			ailes	Totale	Reduite
		unité	mm	mm	mm
F-1	L44x44x6.4	3	21	920	600
F-2	L38x38x3.2	3	20	923	600
F-13	L38x38x3.2	3	21	650	300

Tableau 4-5 : Spécimens proposés par Lainco

La Figure 4-22 présente le ratio de la charge P/P_y en fonction de l'élongation pour tous les spécimens proposés par Lainco. Nous remarquons que le comportement global de ces spécimens est adéquat en considérant les déformations enregistrées avant la rupture. La pente de la zone élastique est la même pour tous ces essais.

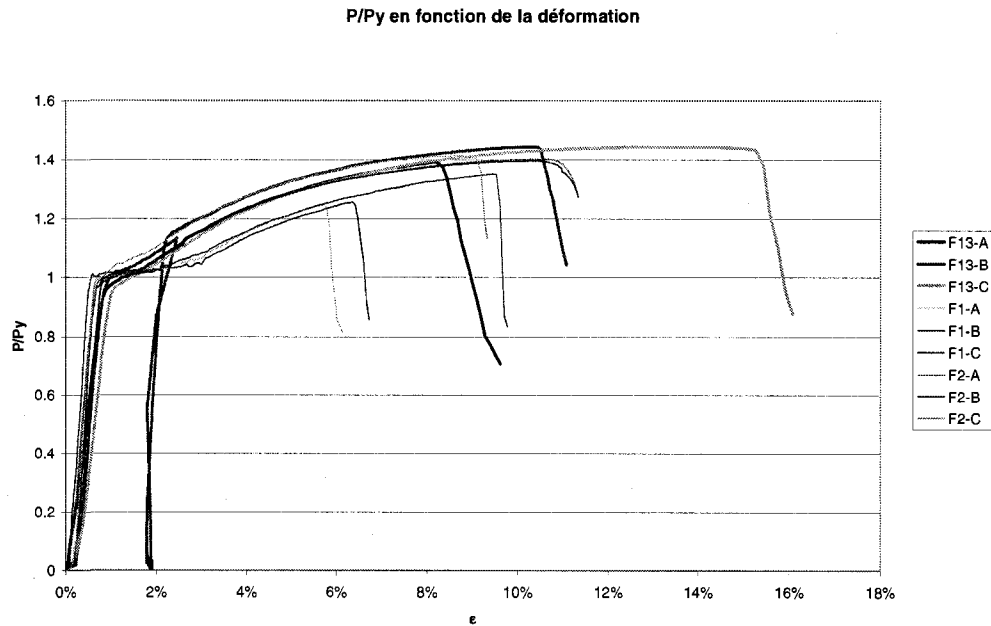


Figure 4-22 : P/P_y en fonction de la déformation pour les spécimens

Proposés par Lainco

Nous remarquons à la Figure 4-22 que le comportement global de ces essais est adéquat. Néanmoins, afin de bien visualiser les courbes de chacune des géométries, nous avons, dans les prochains graphiques, présenté les courbes de chacune des géométries.

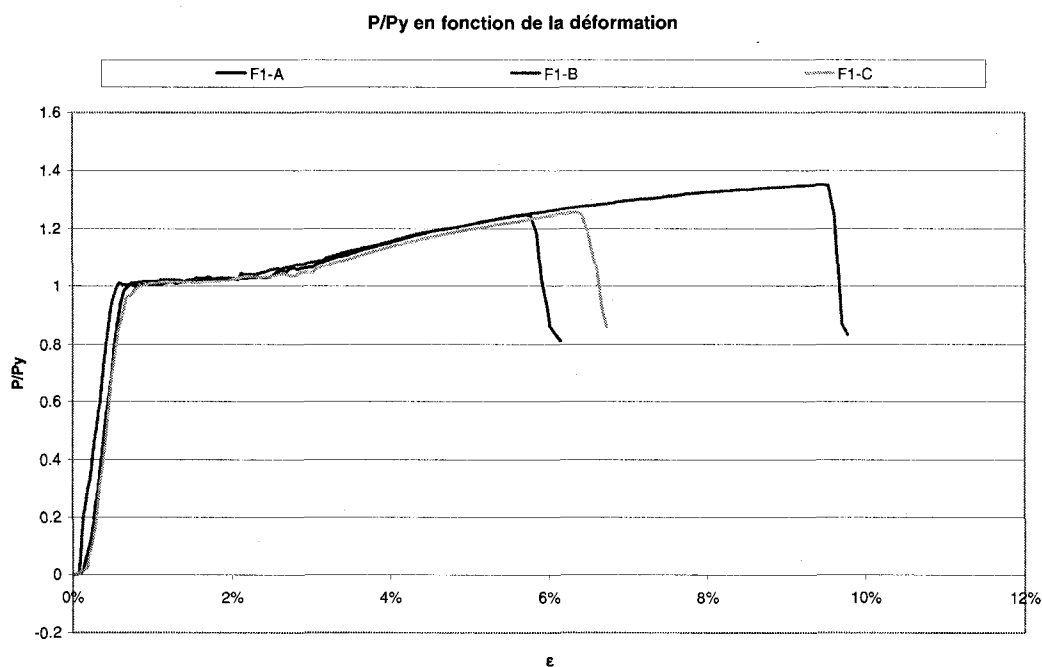


Figure 4-23 : P/P_y en fonction de la déformation pour les spécimens F1-A,
F1-B et F1-C

Comme montré à la Figure 4-23, l'élongation a été de 6% pour deux de ces spécimens alors qu'il était de 10% pour le troisième. Il est difficile de tirer des conclusions sur les raisons expliquant ces différences, puisque ces essais ont été réalisés que dans un but comparatif, et par conséquent, ils n'ont pas été mesurés préalablement afin de déterminer l'aire de la section la plus réduite, et ainsi expliquer le surplus d'élongation et de résistance du spécimen F1-B.

La deuxième géométrie propose des spécimens similaires aux précédents, à l'exception du profilé qui est différent. Les résultats pour ces spécimens sont présentés à la Figure 4-24 . Nous remarquons que le facteur d'écrouissage pour les trois essais de cette géométrie est similaire à 1.4. De plus, l'élongation est de 9% pour un essai et de 11% pour les deux autres.

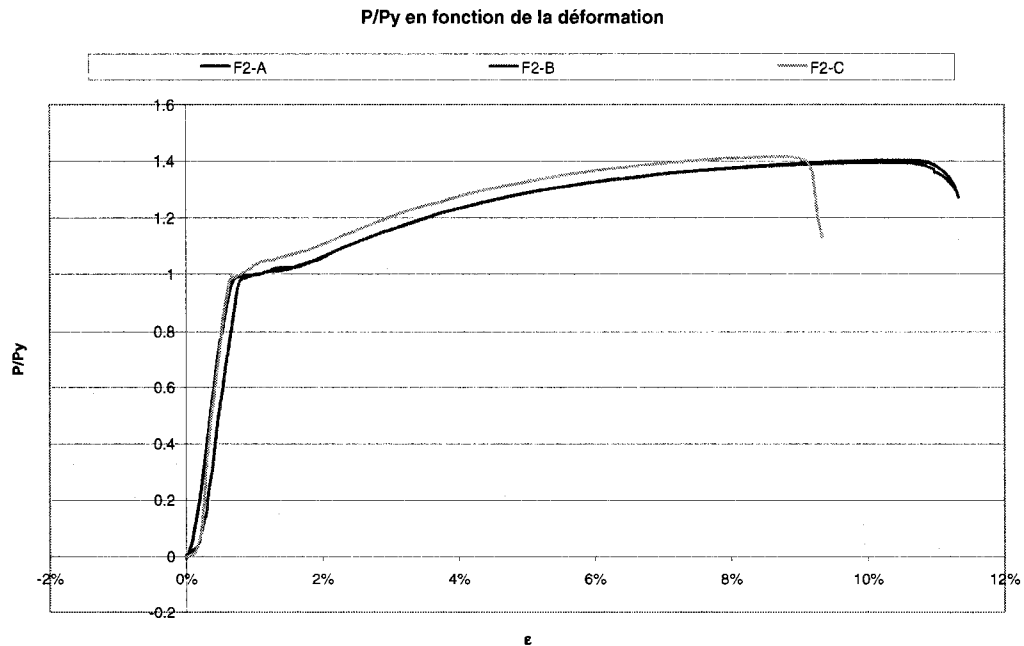


Figure 4-24 : P/P_y en fonction de la déformation pour les spécimens F2-A,
F2-B et F2-C

La troisième géométrie propose de faire varier le profilé et sa longueur. La Figure 4-25 présente le ratio de la charge P/P_y en fonction de l'élongation. La superposition des courbes nous indique que les trois spécimens ont été réalisés à partir du même acier. Le facteur d'écroutissage est aussi le même pour ces spécimens à 1.4. Cependant, l'élongation diffère pour chacun des spécimens. Il est de 8% pour le spécimen A, 10% pour le spécimen B et 15% pour le spécimen C.

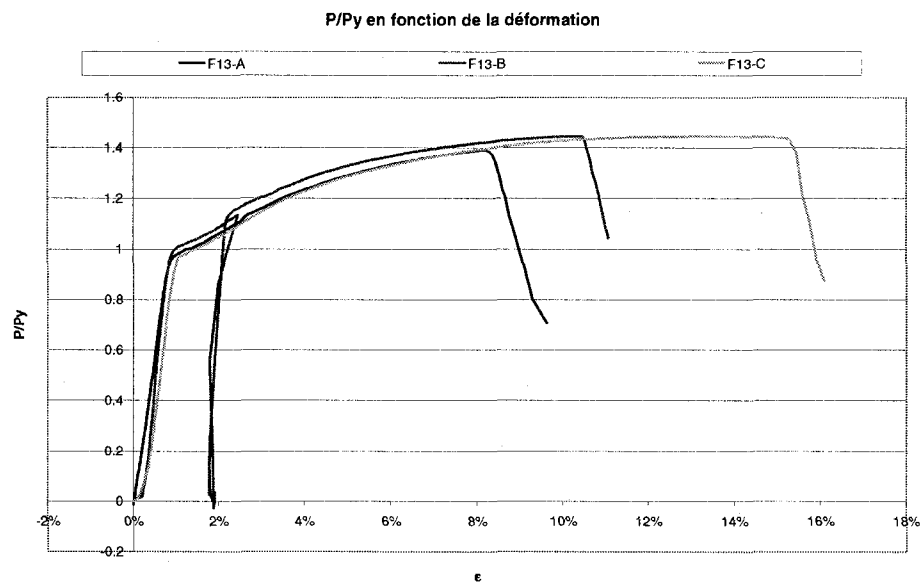


Figure 4-25 : P/P_y en fonction de la déformation pour les spécimens F13-A, F13-B et F13-C

4.10.3 Description spécifique de chacun des essais

Nous avons jusqu'à présent, dressé le comportement global de tous les essais. Dans cette section, nous présenterons les résultats spécifiques obtenus pour chacun des essais.

4.10.3.1 Spécimen 1-1A

Le spécimen 1-1A est un spécimen dont la longueur de la section réduite s'étend sur 600mm. Nous avons installé six (6) jauges de manière à pouvoir observer l'élongation locale de chacune des ailes à trois (3) localisations (voir la section 4.9.1.1 pour la position des jauges).

Ce spécimen était le premier de la série. Nous n'avions pas marqué et mesuré la largeur des ailes pour ce spécimen. Néanmoins, les résultats obtenus suite à cet essai nous ont permis de tirer plusieurs résultats concluants.

Les Figure 4-26, Figure 4-27 et Figure 4-28 présentent, respectivement, les microdéformations ($\mu\epsilon$) enregistrées par les jauges supérieures, centrales et inférieures, et ce, en fonction du temps.

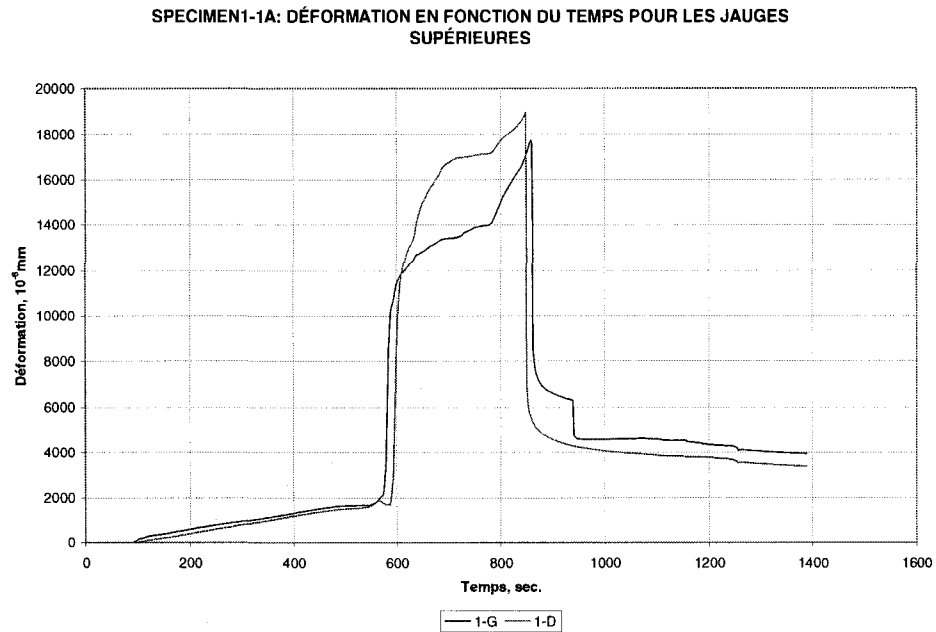


Figure 4-26 : Spécimen 1-1A – Déformation en fonction du temps pour les jauges supérieures

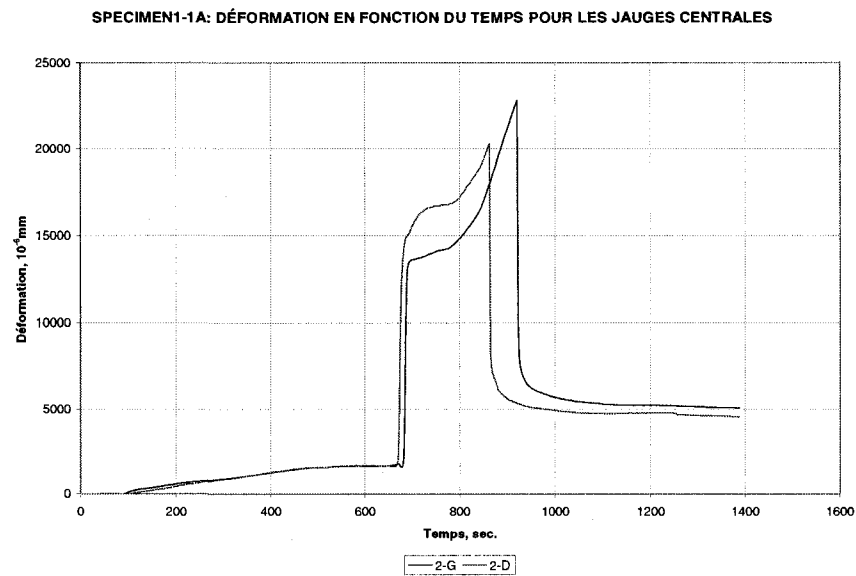


Figure 4-27 : Spécimen 1-1A – Déformation en fonction du temps pour les jauges centrales

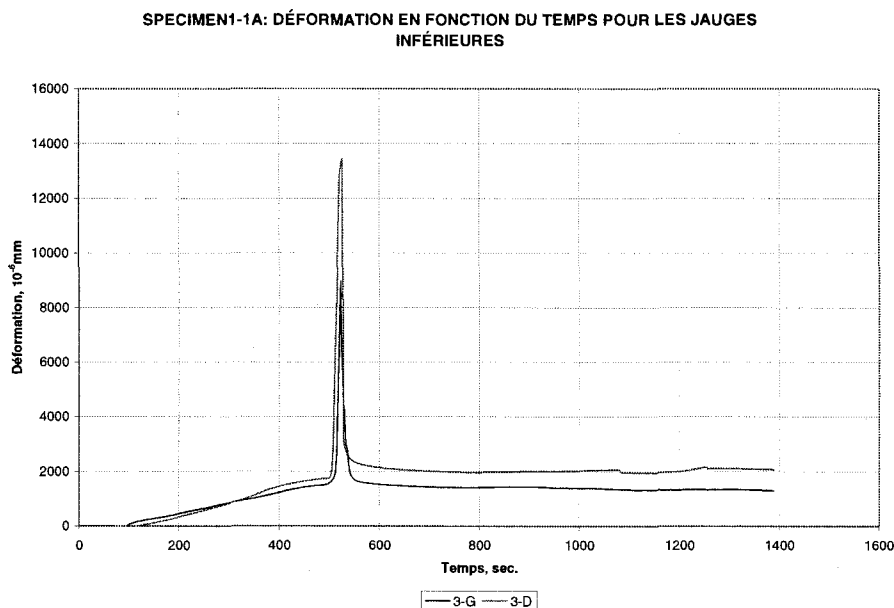


Figure 4-28 : Spécimen 1-1A – Déformation en fonction du temps pour les jauges inférieures

Deux courbes sont tracées sur chacun de ces graphiques. Elles correspondent aux jauges collées sur chacune des ailes à un même niveau. Nous présentons, à ces graphiques, les microdéformations enregistrées par les jauges en fonction du temps. En observant individuellement chacun des graphiques, nous remarquons que le comportement des deux ailes est constant pour une hauteur donnée. Ainsi, à partir de cette observation, nous pourrions installer une jauge par hauteur donnée pour les autres essais.

De plus, nous observons que l'apogée de microdéformations est atteinte à 850 secondes après le début de l'essai pour les jauges à sortie de la première zone de transition (1G et 1D) et à la mi-portée (2G et 2D), et à 525 secondes pour les jauges à la deuxième zone de transition (3G et 3D). D'ailleurs, il a été observé que la rupture est survenue à proximité de la deuxième zone de transition. Par conséquent, nous pouvons croire que les défauts reliés à la découpe du spécimen aurait entraînés une réduction localisée de l'aire de la section et que cette dernière était à proximité des jauges 3G et

3D, ce qui pourrait expliquer que les jauges ont enregistré des pics de microdéformations plus rapidement que les jauges situés ailleurs sur le spécimen.

La Figure 4-29 et Figure 4-30 montrent le spécimen 1-1A suivant sa rupture.

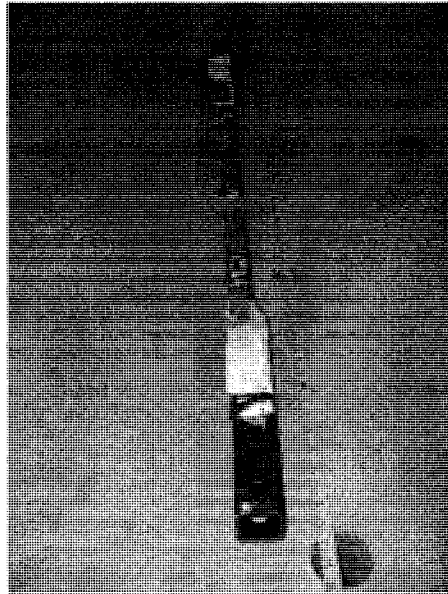


Figure 4-29 : Spécimen 1-1A



Figure 4-30 : Spécimen 1-1A

4.10.3.2 Spécimen 2-3A

Le spécimen 2-3A a la même géométrie que le précédent spécimen (1-1A).

Cependant, contrairement au spécimen 1-1A, nous avons entrepris de mesurer la largeur des ailes avant de procéder à l'essai. De plus, nous n'avons installé que deux (2) jauges pour ce spécimen. Ainsi, puisque toutes les jauges ont enregistré des microdéformations excédant leur limite établie par le manufacturier, et que ces enregistrements ont été relativement constant sur toute la longueur du spécimen 1-1A, nous avons décidé de réduire le nombre de jauges nécessaires à deux (2), soit une

jauge à la sortie d'une zone de transition et une jauge à la mi-portée du spécimen.

La Figure 4-31 présente l'enregistrement des microdéformations des jauges en fonction du temps.

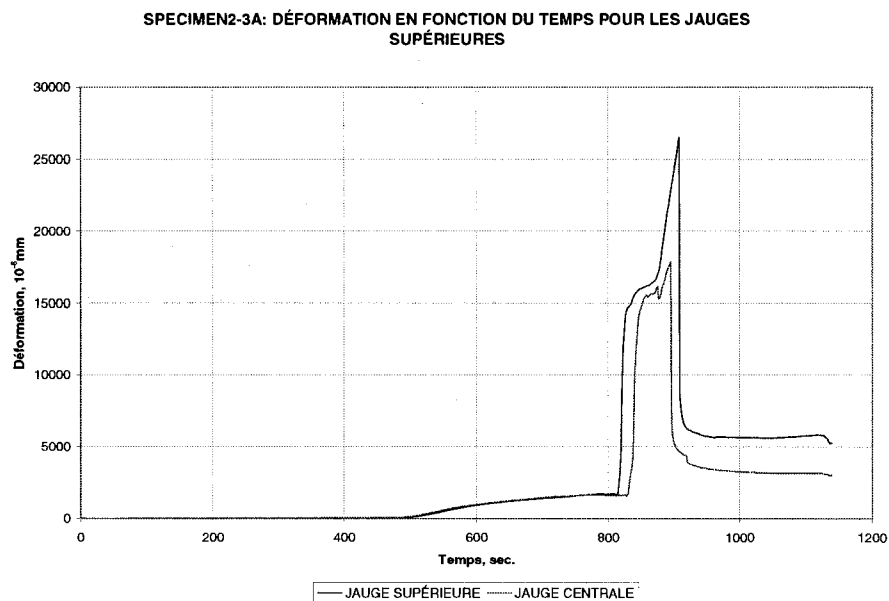


Figure 4-31 : Spécimen 2-3A – Déformation en fonction du temps pour les jauges supérieures

Nous présentons sur ce graphique les déformations enregistrées par la jauge installée à la sortie de la zone de transition et les déformations enregistrées par la jauge collée à mi-portée du spécimen. Comme le montre le graphique, la jauge supérieure enregistre des microdéformations nettement plus élevées que celle collée à mi-portée du spécimen. En observant la Figure 4-32, nous pouvons mieux comprendre les raisons expliquant cette différence.

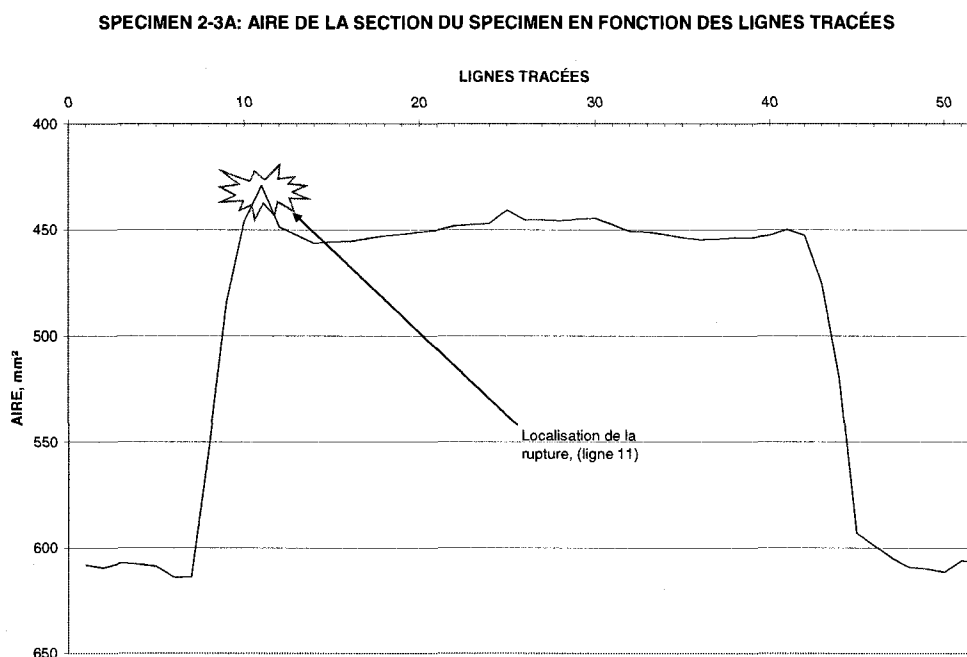


Figure 4-32 : Spécimen 2-3A – Aire de la section en fonction des lignes tracées

Comme nous l'avons indiqué précédemment, la découpe au chalumeau induit des défauts dans la rectitude des spécimens. La Figure 4-32 nous permet de visualiser ces défauts, en présentant l'aire de la section à tous les 20mm. Il apparaît maintenant évident que les conséquences de ces défauts coïncident exactement avec la section la plus réduite.

Il est à noter que la jauge supérieur était collée à proximité de la zone de rupture ce qui explique qu'elle ait enregistré des déformations plus importantes.

L'abscisse de la Figure 4-32 représente les lignes tracées à un intervalle de 20mm. Nous les avons ainsi numéroté afin de pouvoir les identifier avant et après l'essai. L'ordonnée pour sa part représente l'aire de la section à cette ligne. Nous montrons la superficie de la section plutôt que la largeur de l'aile, puisque la rupture survient à la

jonction de l'aire la plus réduite.

L'aire de la section est obtenue en fonction la longueur coupée. Ainsi, dépendant de la longueur des ailes, la superficie est donnée par :

$$A_i = A_{nom.} - \left[\left((L_{nom.} - L_{mes1} - t_{nom.}) \cdot t_{nom.} + \frac{\pi \cdot t_{nom.}^2}{4} \right) + \left((L_{nom.} - L_{mes2} - t_{nom.}) \cdot t_{nom.} + \frac{\pi \cdot t_{nom.}^2}{4} \right) \right]$$

Plastification constante

Une attention particulière a été portée à la conception de la zone de transition. Un des objectifs, lorsque nous avons entrepris ce programme expérimental, était de déterminer si la migration de forces est adéquate entre la section pleine et la section réduite des cornières. Suivant les résultats obtenus, nous pouvons prétendre que la conception des zones de transition est adéquate puisque la rupture est survenue sur la section réduite.

De plus, les microdéformations enregistrées par les jauges en fonction du temps, nous indiquent que les cornières ont subi des microdéformations relativement constantes sur toute la longueur des sections réduites.

La Figure 4-33 présente le spécimen 2-3A.

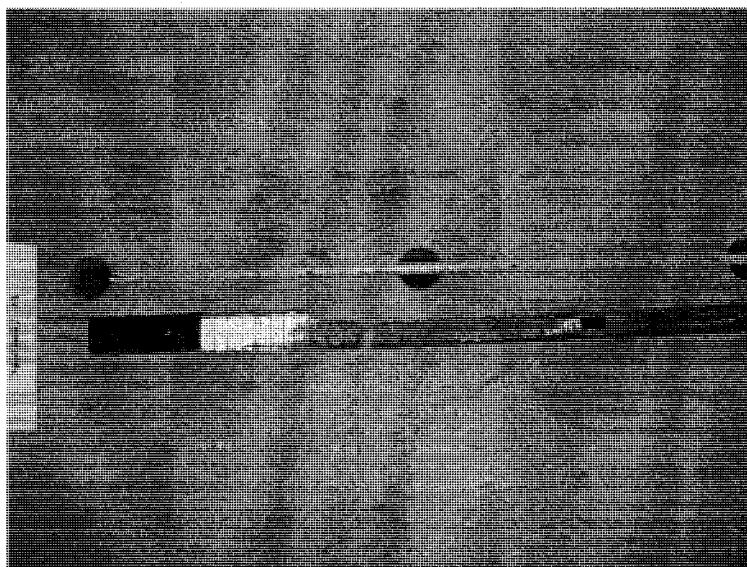


Figure 4-33 : Spécimen 2-3A après l'essai

4.10.3.3 Spécimen 3-2A

Préparation du spécimen

La géométrie du spécimen 3-2A est identique aux spécimens 1-1A et 2-3A.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous n'avons pas mesuré la largeur des ailes pour le premier spécimen. De plus, nous avons remarqué qu'une paire de jauges avait enregistré des déformations plus importantes, certainement due au fait qu'elles étaient à proximité de la localisation de la rupture. Bien que nous croyions que cette localisation coïncide avec la section la plus réduite du spécimen, ces affirmations demeurent hypothétiques. Par conséquent, et afin d'éliminer le volet hypothétique de ces affirmations, nous avons collé six (6) jauges au spécimen 3-2A afin de nous assurer du comportement des spécimens. Ces six (6) jauges ont été collées par paire soit trois (3) jauges sur chacune des ailes. Ainsi, une paire a été collée à chacune des zones de transition et une troisième paire a été collée à la mi-portée du spécimen.

Évidemment, nous avons aussi procédé au mesurage de la largeur des ailes avant le début de l'essai. De cette manière nous pouvions prédire la localisation de la rupture.

La Figure 4-34 présente le spécimen 3-2A après la rupture.



Figure 4-34 : Spécimen 3-2A après l'essai

Résultats

Les Figure 4-35, Figure 4-36 et Figure 4-37 présentent les courbes des déformations locales enregistrées par les jauges en fonction du temps.

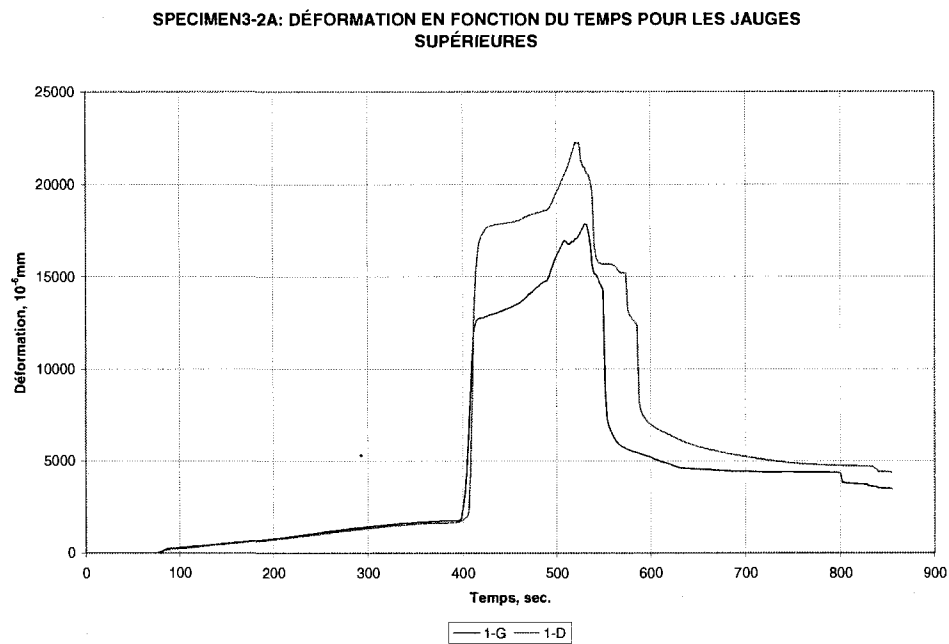


Figure 4-35 : Spécimen 3-2A – Déformation en fonction du temps pour les jauges supérieures

La Figure 4-35 présente les microdéformations pour les jauges supérieures. Nous remarquons que les déformations des jauges ont des tracés similaires. Cependant, nous remarquons que la jauge de droite enregistre des déformations plus élevées.

SPECIMEN3-2A: DÉFORMATION EN FONCTION DU TEMPS POUR LES JAUGES CENTRALES

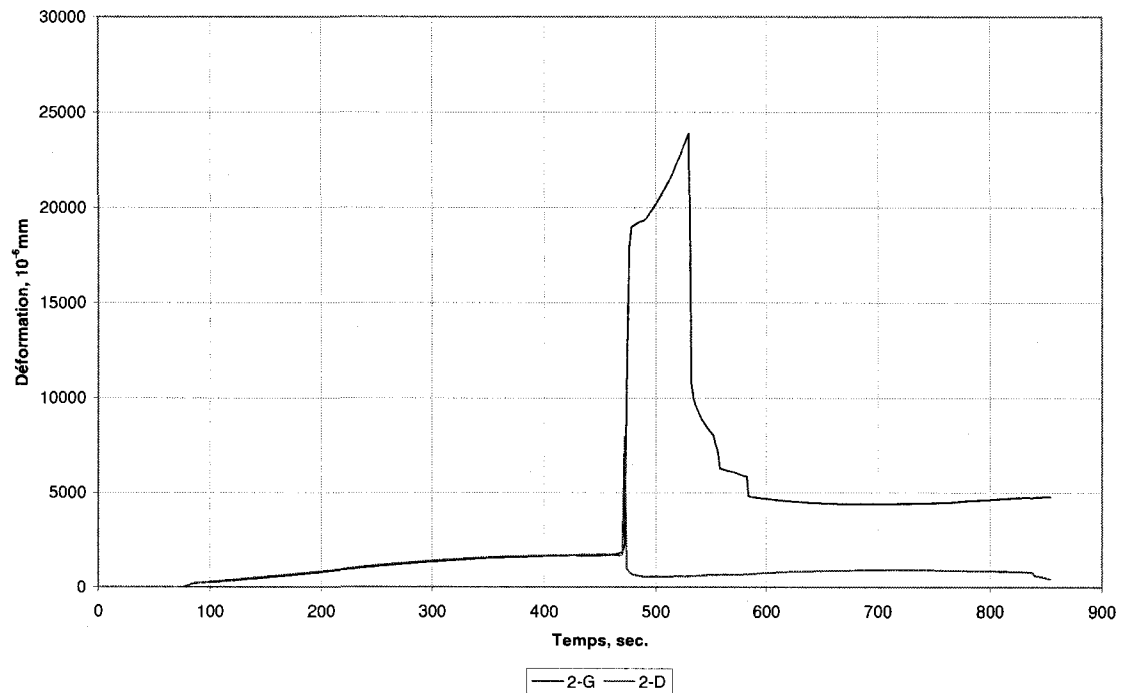


Figure 4-36 : Spécimen 3-2A – Déformation en fonction du temps pour les jauges centrales

Pour les jauges collées à la mi-hauteur, nous voyons que les deux jauges semblaient constantes jusqu'à la 470^e secondes (Figure 4-36).

Nous remarquons néanmoins que le tracé des jauges centrales est similaire au tracé des jauges supérieures. Ainsi, le pic des déformations est obtenu à la 530^e secondes.

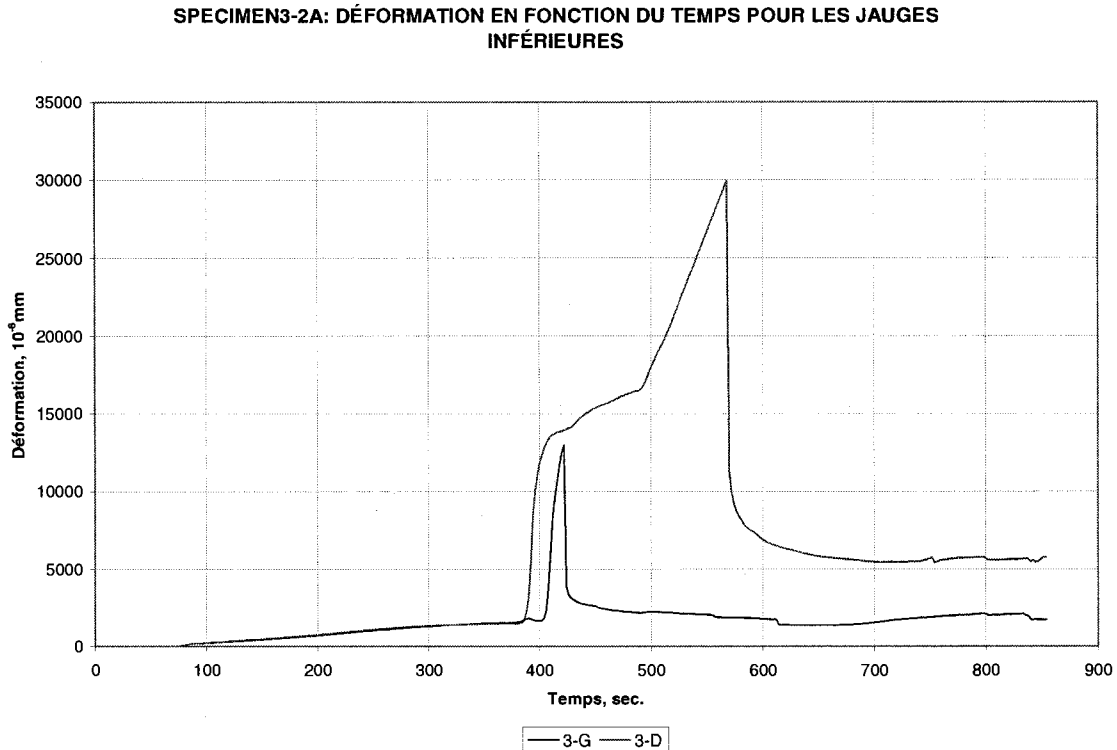


Figure 4-37 : Spécimen 3-2A – Déformation en fonction du temps pour les jauges inférieures

La Figure 4-37 présente les microdéformations des jauges inférieures. Cependant, en observant les résultats de la jauge de droite, nous remarquons qu'elle présente un tracé similaire aux jauges installées à la mi-hauteur, et à l'autre zone de transition.

Contrairement aux jauges supérieures et centrales qui ont enregistré des microdéformations entre $20000\mu\epsilon$ et $25000\mu\epsilon$, nous remarquons que la jauge inférieure droite enregistre des déformations plus importantes ($30000\mu\epsilon$). À partir de cette observation, nous pouvons supposer que la rupture s'est produite à proximité des jauges inférieures.

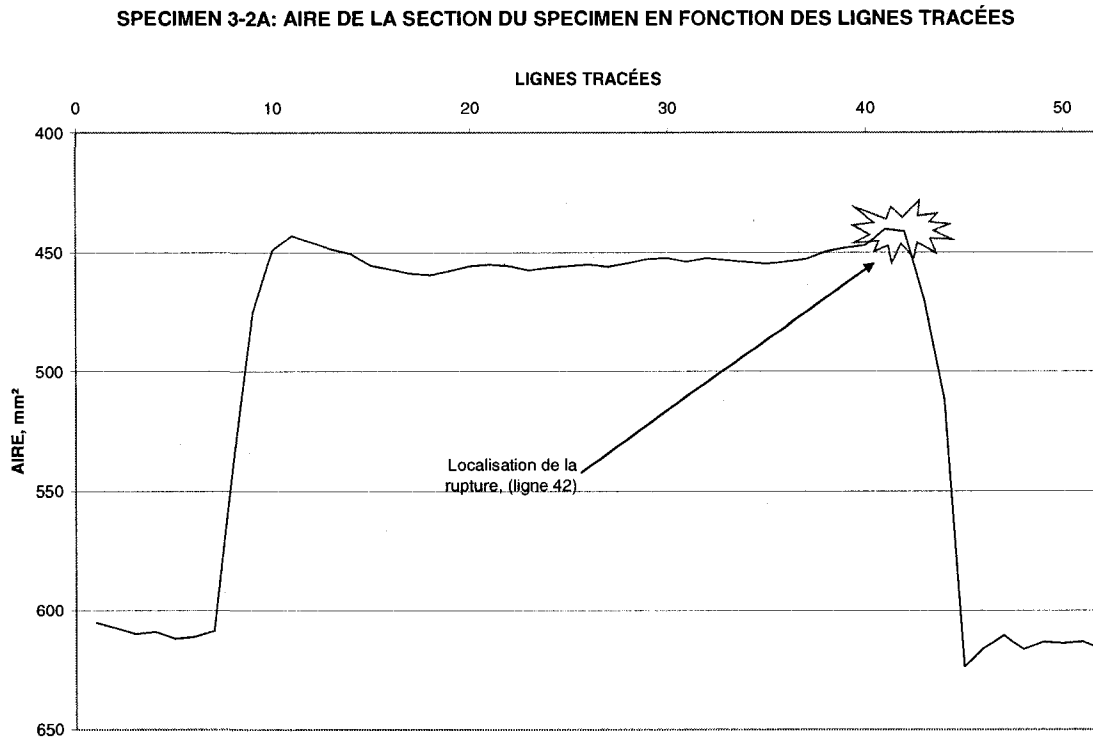


Figure 4-38 : Spécimen 3-2A – Aire de la section en fonction des lignes tracées

La Figure 4-38 présente l'aire de la section à tous les 20mm. En observant cette courbe, nous remarquons que la rupture de ce spécimen s'est produite au droit de la section la plus réduite qui coïncide justement avec l'emplacement des jauges inférieures.

4.10.3.4 Spécimen 4-1B

Le spécimen 4-1B est le premier spécimen dont la section réduite est plus longue. Notre première idée était de doubler la longueur de la section réduite, soit de 600 à 1200mm, mais les limitations de la presse nous ont limité à une hauteur de 1087mm.

L'arc de cercle formant la zone de transition est cependant le même que pour les essais

précédents. De plus, la largeur des ailes a aussi été fixée à 38mm.

Nous avons, pour cet essai, collé six (6) jauges de la même manière que dans les essais précédents, soit une paire à chacune des zones de transition et une paire à la mi-hauteur. Bien que les essais sur les spécimens plus courts nous indiquaient que l'installation de deux (2) jauges était suffisante, nous voulions tout de même confirmer que le comportement était constant même lorsque le fusible était plus long.

Nous avons aussi procédé au mesurage de la largeur des ailes à un intervalle de 20mm pour mieux prédire la localisation de la rupture et afin de nous assurer d'une déformation constante sur toute la longueur de la section réduite.

La Figure 4-39, la Figure 4-40 et la Figure 4-41 présentent, les déformations enregistrées par les jauges en fonction du temps.

Bien que leur comportement soit similaire, nous remarquons, à la Figure 4-39, que la jauge supérieure gauche a enregistré des déformations plus élevées que la jauge supérieure droite.

SPECIMEN4-1B: DÉFORMATION EN FONCTION DU TEMPS POUR LES JAUGES SUPÉRIEURES

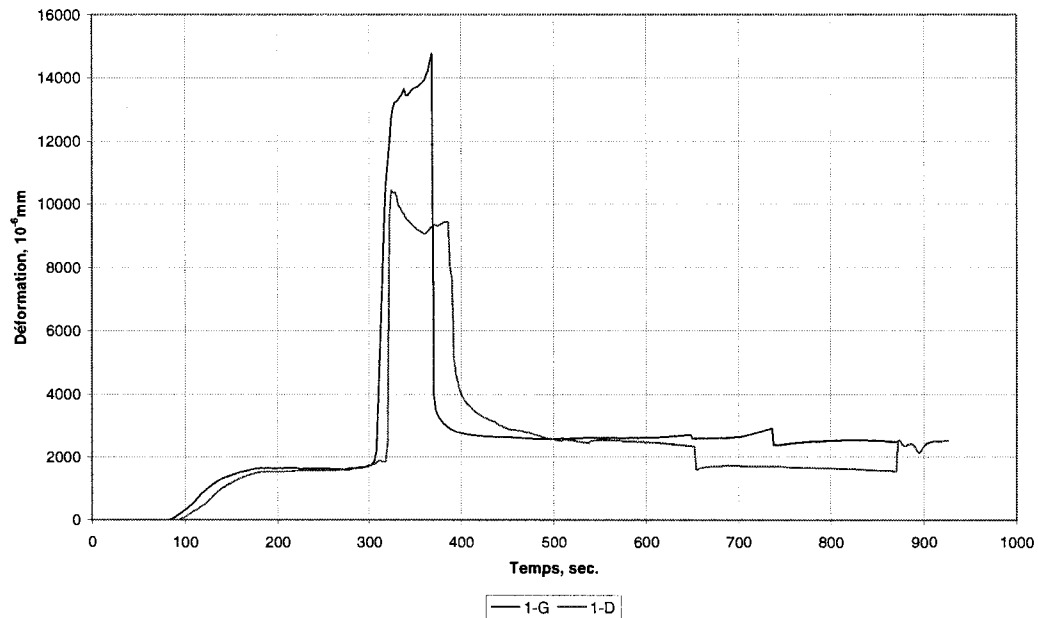


Figure 4-39 : Spécimen 4-1B – Déformation en fonction du temps pour les jauges supérieures

En observant la Figure 4-40, nous remarquons que les déformations enregistrées par les deux (2) jauges centrales étaient constantes. Malheureusement, la jauge de gauche a cessé d'enregistrer après avoir atteint une déformation de $15000\mu\epsilon$.

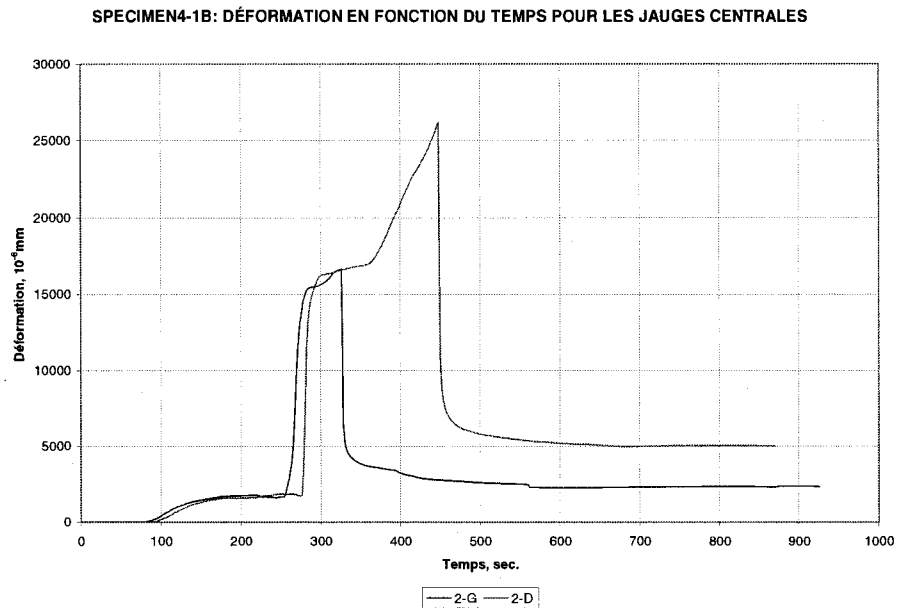


Figure 4-40 : Spécimen 4-1B – Déformation en fonction du temps pour les jauges centrales

Comme pour les jauges centrales, les jauges au niveau inférieur enregistraient des déformations constantes jusqu'à ce que la jauge de gauche atteigne une déformation de $15000\mu\epsilon$ (Figure 4-41).

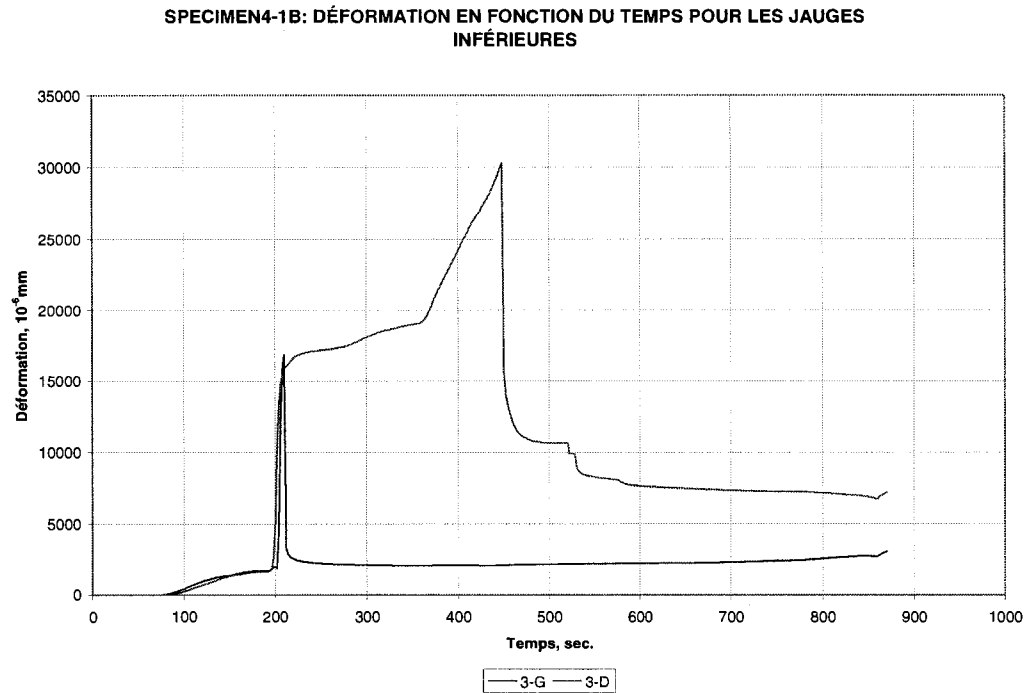


Figure 4-41 : Spécimen 4-1B – Déformation en fonction du temps pour les jauges inférieures

En comparant les résultats obtenus à chacun des niveaux, nous remarquons que les jauges au niveau inférieur ont enregistré de plus grandes déformations, ce qui nous laisse croire que la rupture a eu lieu à proximité de ces dernières.

En observant la Figure 4-42 qui présente l'aire de la section à tous les 20mm, nous remarquons que la rupture a eu lieu au droit de la section la plus réduite, cette dernière coïncidant avec la localisation des jauges ayant enregistré les déformations les plus importantes.

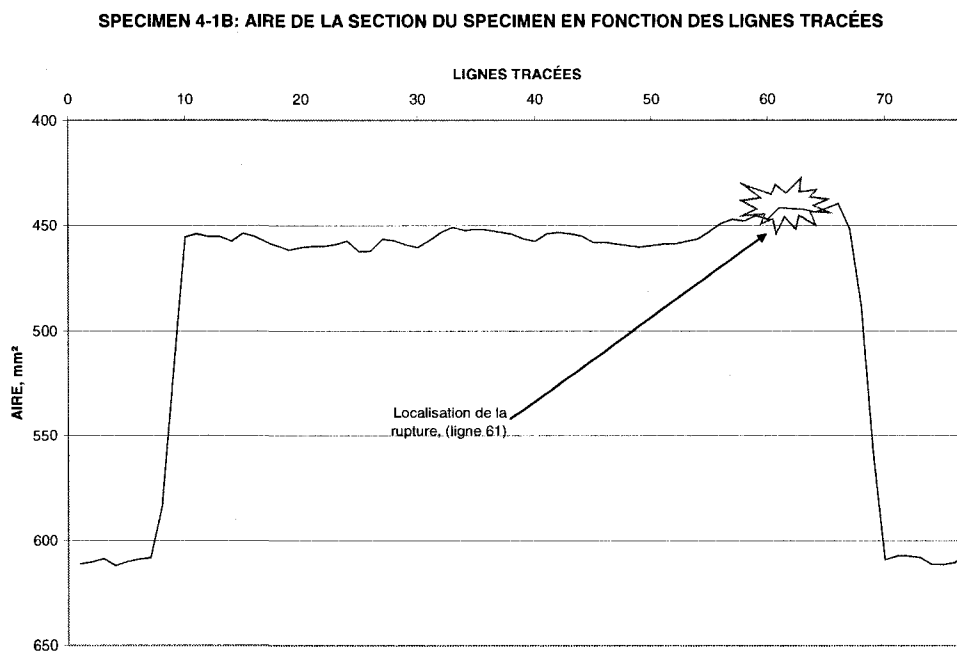


Figure 4-42 : Spécimen 4-1B – Aire de la section en fonction des lignes tracées

4.10.3.5 Spécimen 5-2B

Le spécimen 5-2B a la même géométrie que le spécimen 4-1B. Ainsi, le fusible a une longueur de 1087mm et l'arc de cercle formant la zone de transition est la même. Nous avons aussi procédé au mesurage de la largeur des ailes à tous les 20mm.

Cependant, pour ce spécimen, nous n'avons collé que deux (2) jauges soit, une jauge à une zone de transition et une jauge à mi-hauteur.

La Figure 4-43 présente les déformations enregistrées par les (2) jauges installées à ce

spécimen. Comme nous pouvons le remarquer, les déformations obtenues sont constantes jusqu'à ce que la jauge centrale enregistre une déformation de 24800 micromètres. À partir de ces valeurs, la jauge centrale a cessé d'enregistrer des valeurs.

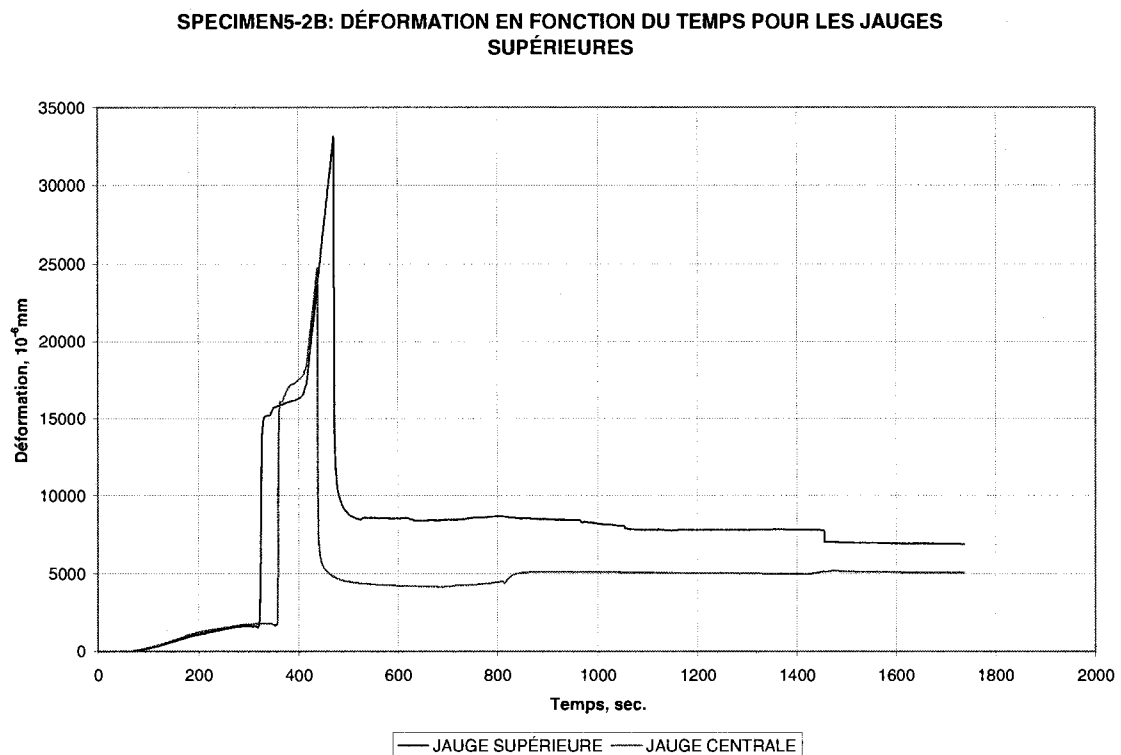


Figure 4-43 : Spécimen 5-2B – Déformation en fonction du temps pour les jauges supérieures

Comme pour les spécimens précédents, nous remarquons, en observant la Figure 4-44, que la rupture du spécimen s'est produite au droit de la section la plus petite. Nous remarquons que la section la plus réduite est à la mi-hauteur du spécimen, contrairement aux autres spécimens, pour lesquels leur section la plus réduite était à la sortie de la zone de transition.

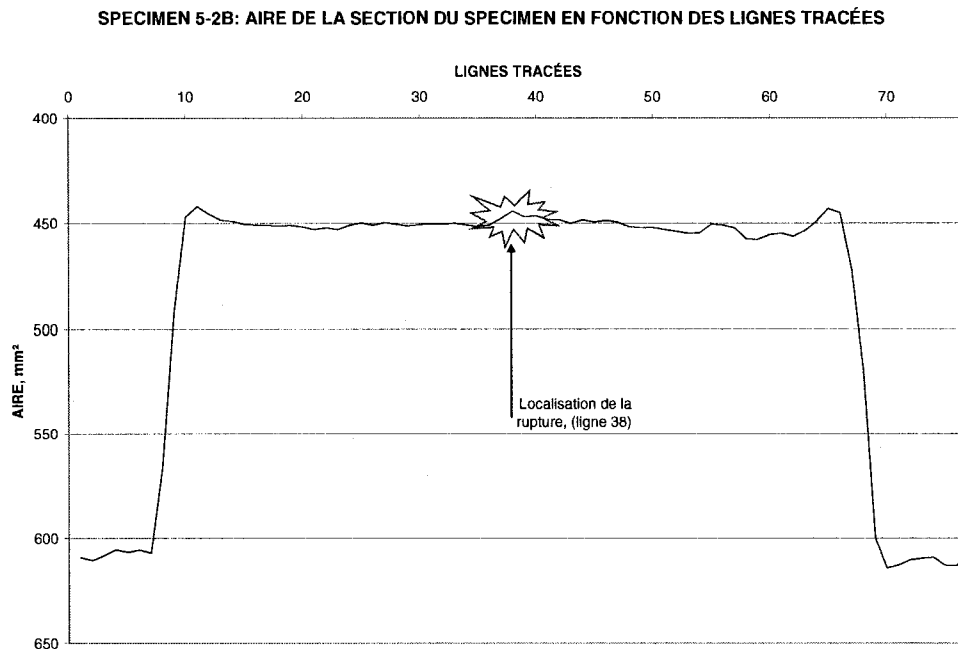


Figure 4-44 : Spécimen 5-2B – Aire de la section en fonction des lignes tracées

4.10.3.6 Spécimen 6-3B

Le spécimen 6-3B est une réplique des spécimens 4-1B et 5-2B. Ainsi, la longueur de la section réduite, la largeur des ailes et l'arc de la zone de transition sont les mêmes pour ces trois spécimens.

Nous avons, comme pour les autres spécimens, mesuré la largeur des ailes à tous les 20mm afin de pouvoir prédire et expliquer la localisation de la rupture. De plus, nous avons, comme pour le spécimen précédent, collé deux (2) jauges.

La Figure 4-45 présente la déformation enregistrée par les jauges en fonction du temps. Nous remarquons que les deux jauges ont le même comportement, mais que la jauge centrale accuse un délai de quelque 100 secondes dans l'enregistrement des déformations. De plus, nous remarquons que la jauge supérieure a enregistré des

déformations excédant les valeurs enregistrées par la jauge centrale.

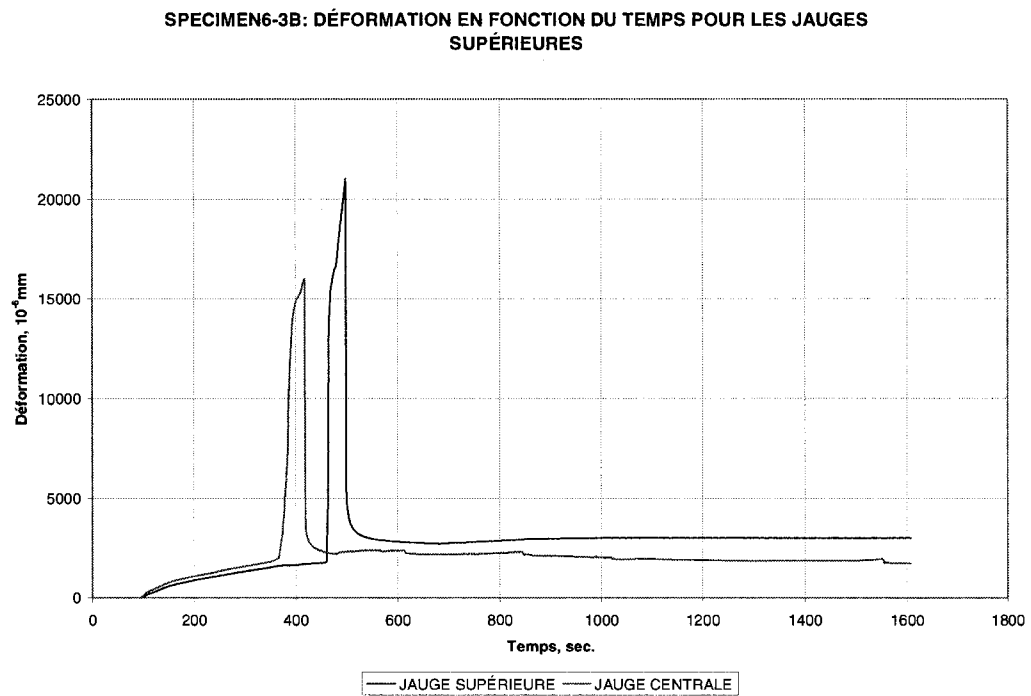


Figure 4-45 : Spécimen 6-3B – Déformation en fonction du temps pour les jauges supérieures

En observant la Figure 4-46, nous remarquons que la rupture se produit, pour ce spécimen aussi, au droit de la section la plus réduite. De plus, nous remarquons que la localisation de la rupture se situe à proximité de la jauge supérieure. Nous pouvons ainsi mieux expliquer la différence obtenue dans l'enregistrement de la déformation.

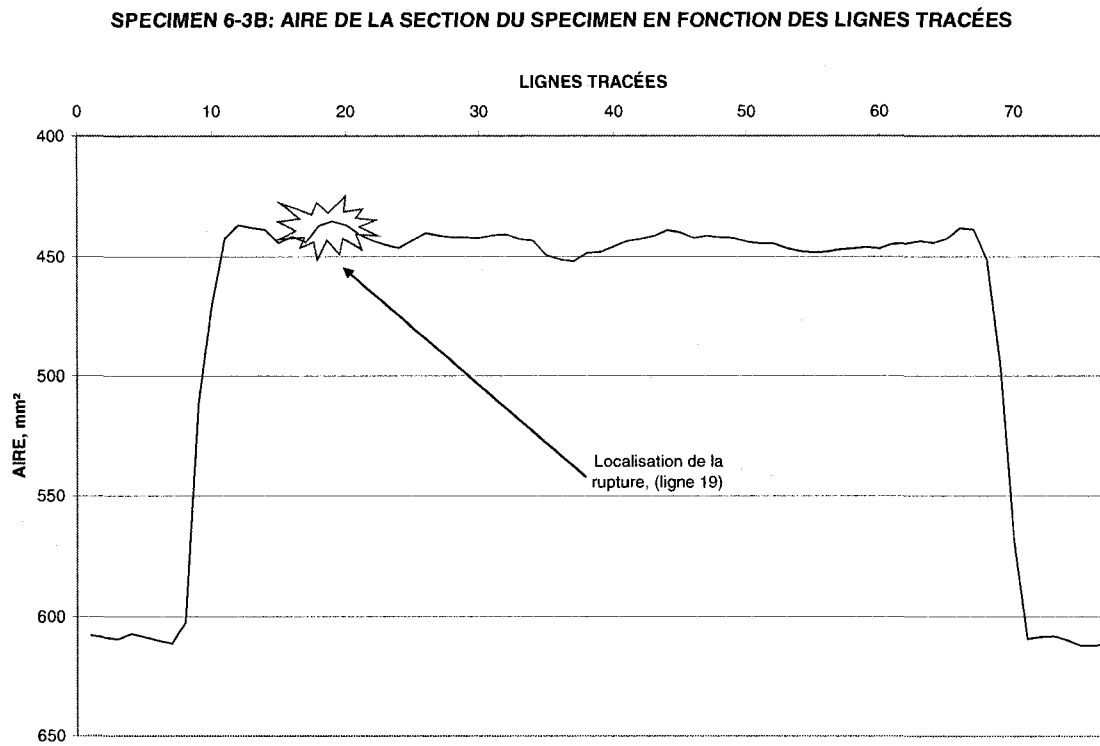


Figure 4-46 : Spécimen 6-3B – Aire de la section en fonction des lignes tracées

La Figure 4-47 présente le spécimen 6-3B après la rupture.

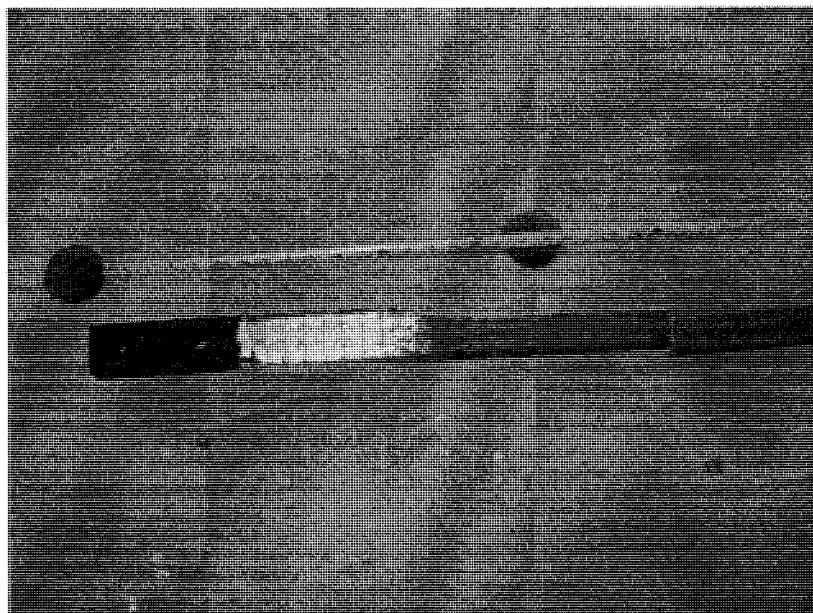


Figure 4-47 : Spécimen 6-3B après la rupture

4.11 Discussions

Le premier programme expérimental avait pour but de bien comprendre le comportement des fusibles avant de pouvoir les introduire aux diagonales.

La courbe d'acier de chacun des spécimens présentait les mêmes segments. Ainsi, la droite élastique s'étalant jusqu'à la contrainte de limite élastique, vient ensuite le plateau plastique et finalement la zone d'écrouissage caractérisée par une hausse de la résistance du spécimen, et ce, jusqu'à la rupture. La rupture se produit de façon subite après striction de la section dans la zone où se produit la rupture. La nature soudaine de la rupture est attribuable au fait que l'essai est réalisé en contrôle de charge.

De plus, nous avons remarqué que la migration des forces est adéquate à travers de la zone de transition. Ainsi, pour aucun des spécimens, une concentration de contraintes en un point résultant en la rupture prématurée ne s'est produite.

Cependant, nous avons remarqué que pour la majorité des spécimens, la rupture s'est produite à la sortie de la zone de transition. Néanmoins, nous ne croyons pas que la rupture se produisait à cette localisation en raison d'une concentration de contrainte, mais en raison de la méthode de découpe qui réduisait localement l'aire de la section. Ainsi, en observant les courbes montrant l'aire des sections, nous remarquons que la rupture se produit vis-à-vis la section la plus réduite, et que cette section coïncide, pour ces spécimens, à la sortie de la zone de transition. A la lumière de ces données, nous croyons que lors de la découpe de l'arc de cercle formant la zone de transition, l'utilisation du chalumeau doit être fait en attribuant une attention toute particulière pour ne pas réduire localement la section du fusible. Une solution alternative, somme toute raisonnable, est d'assurer la géométrie des fusibles en les faisant usiner. De plus, l'usinage des pièces permet aussi de réduire du facteur d'écrouissage.

Un autre objectif de ce programme expérimental était d'évaluer si la plastification était uniforme sur toute la longueur de la section réduite des fusibles. L'enregistrement des déformations par les jauges, nous a, jusqu'à une certaine limite, indiqué que les déformations sont constantes sur toute la hauteur des spécimens.

Cependant, la déformation locale de tous les spécimens dépassait la limite de $15000\mu\epsilon$ indiqués par le fabricant de jauges. Au-delà de ce niveau, les déformations enregistrées ne peuvent être certifiées.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, nous avons peinturé tous les spécimens à l'aide d'une peinture à base de chaux. Cette fine mince couche de peinture appliquée aux spécimens s'écaillent et décollent à mesure que les déformations plastiques se forment. Comme prévu, l'écaillage de la peinture à base de chaux a été observé sur toute la hauteur des spécimens durant les essais. Étant présent lors des essais, nous pouvons mentionner que les fusibles ont subi une plastification constante sur toute leur longueur, puisque la grande majorité de la peinture à base de chaux avait décollé, et ce, sur toute la hauteur de la section réduite des spécimens.

4.12 Conclusion du programme expérimental 1

Les objectifs du premier programme expérimental étaient d'étudier le comportement des cornières qui formeront les fusibles.

À la suite des essais, nous pouvons affirmer que le comportement global des cornières est adéquat. En ce sens, la zone de transition a su faire migrer les forces entre la section originale et la section réduite. De plus, nous avons remarqué que la plastification de la section réduite s'est faite sur toute la longueur réduite. Finalement, la rupture des spécimens se produisait, pour tous les essais, au droit de la section la plus petite.

À la lumière de ces résultats positifs, nous avons maintenant entrepris les essais sur des diagonales avec un fusible formé par l'agencement de quatre (4) cornières.

Nous aimerions néanmoins émettre une recommandation quant à la découpe des spécimens. Comme nous l'avons remarqué, la rupture des spécimens se produisait, dans tous les cas, au droit de la section la plus réduite. Nous avons aussi remarqué que cette section était, dans la majorité des cas, localisée à la sortie de la zone de transition. Par conséquent et suivant ces observations, nous suggérons de porter une attention particulière lors de la découpe de l'arc de cercle. Alternativement, nous pensons que l'usinage des cornières est une option judicieuse afin d'assurer une géométrie prescrite.

CHAPITRE 5 – PROGRAMME EXPERIMENTAL 2 – CADRE D’ESSAI

5.1 Objectifs

Nous avons étudié, au chapitre précédent, le comportement individuel des fusibles sous une charge de traction. Les résultats obtenus, à la suite des essais, ont été positifs, ce qui nous a encouragé à poursuivre nos études en étudiant le comportement des fusibles lorsque ces derniers sont ajoutés aux diagonales de contreventement.

Pour ce programme expérimental, les essais ont été réalisés sur des diagonales de contreventement auxquelles nous aurons introduit des fusibles. Les diagonales étaient placées dans un cadre en acier de façon à reproduire des conditions frontières réalistes et représentatives de la réalité. Nous avons soumis ces diagonales à des cycles de chargement imposant aux spécimens des efforts alternés de traction et de compression.

L’objectif de ce programme expérimental était de définir des fusibles plus résistants en compression que la diagonale, mais qui ne développent que la résistance requise en traction et ce, afin de réduire les charges de traction transmise aux composantes structurales adjacentes.

En plus de procéder à des essais sur les fusibles formés par l’agencement de quatre (4) cornières, nous avons procédé à des essais sur des fusibles qui sont présentement utilisés dans la pratique. Ces résultats nous ont donné un éventail de données utiles pour des fins de comparaisons.

5.2 Choix (justifications) et conception des spécimens

5.2.1 Cadre d'essai

Les résultats de l'étude paramétrique indiquent que le profilé tubulaire le plus récurrent est le HSS114x114x6.4. Cependant, en suivant les recommandations de Lainco à l'effet que ce profilé ne pouvait être obtenu facilement des fournisseurs, nous avons plutôt opté pour un autre profilé tubulaire, soit un HSS102x102x4.8. Bien que le HSS127x127x6.4 fût mentionné au chapitre précédent, la résistance de ce profilé était supérieure à la charge pouvant être développé par le vérin, et que par conséquent, nous ne pouvons produire la rupture de ce profilé.

L'étude paramétrique nous indique aussi que le rapport d'élancement (KL/r) pour lequel les économies sont les plus importantes est de 120 pour ce profilé.

Pour recréer un contreventement en X ($K = 0.5$) à partir des propriétés géométrique du profilé tubulaire HSS102x102x4.8 et en respectant un rapport d'élancement de 120, nous devons envisager que la diagonale ait une longueur d'environ 11m (10.93m) :

$$\frac{KL_e}{r} = 120$$

$$K = 0.5$$

$$r_{HSS102 \times 102 \times 4.8} = 38.7 \text{ mm}$$

$$L_e = 0.85L$$

$$\therefore L_e = \frac{120 \times 38.7}{0.5 \times 0.85} = 10927 \text{ mm}$$

Cependant, les dimensions du cadre d'essai sont de 6000x3750mm. En se référant aux recherches antérieures, qui ont démontré que le flambement des diagonales ne se produisait que dans une demi-diagonale, nous avons décidé de procéder à des essais sur une diagonale simple, qui représente une demi-diagonale (Figure 5-1).

La Figure 5-2 montre le cadre d'essai tel qu'utilisé au laboratoire.

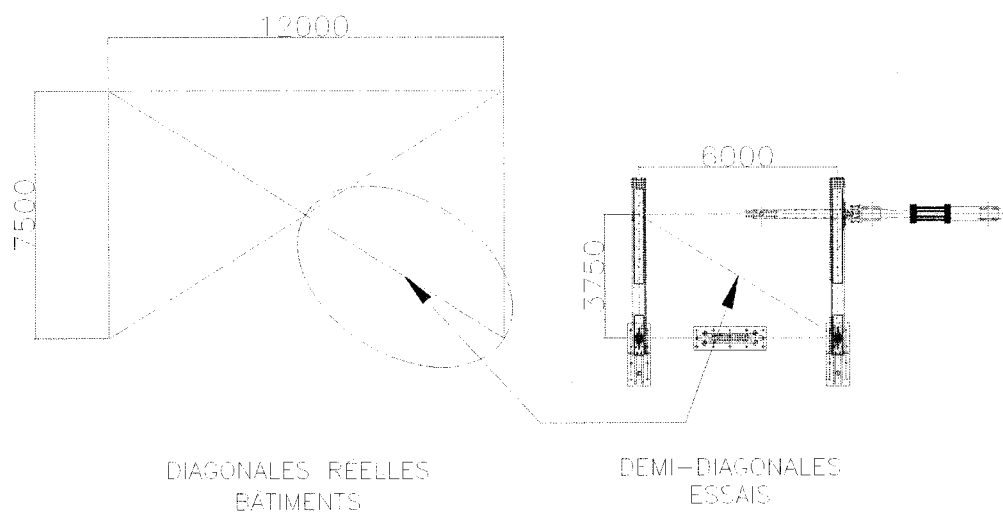


Figure 5-1 : Représentation des diagonales utilisées pour les essais

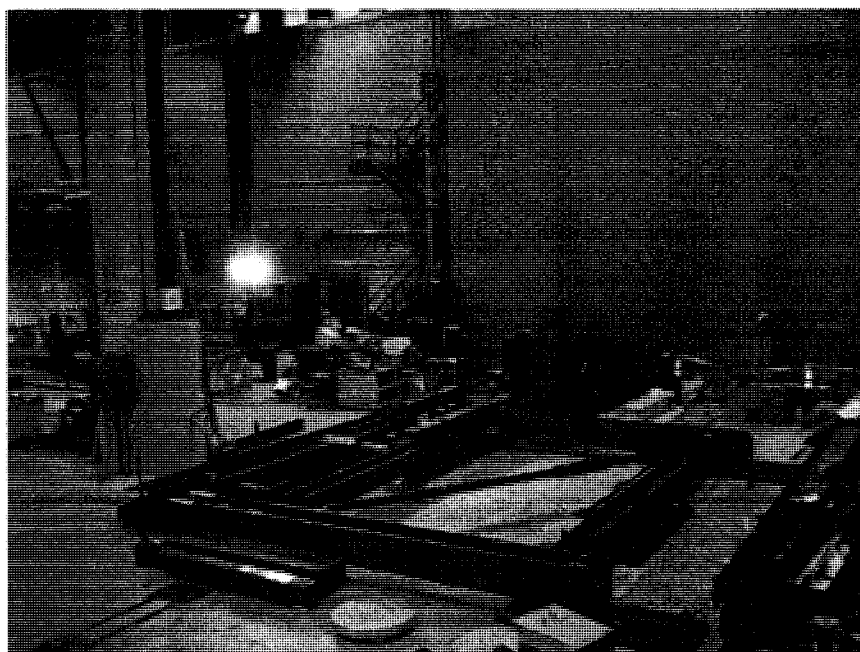


Figure 5-2 : Cadre d'essai

5.2.2 Poutre

La poutre est formée d'un profilé W310x79 choisi en fonction de la capacité maximale du vérin (1000kN). La portée non supportée de la poutre est de 6000mm.

Le profilé a été choisi en fonction de sa résistance en compression qui est obtenue, pour un profilé doublement symétrique, à partir de l'Équation 5-1.

Équation 5-1

$$C_r = \phi A F_y (1 + \lambda^{2n})^{-1/n}$$

$$\lambda = \frac{KL}{r} \sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 E}}$$

En considérant un W310x79, nous obtenons une résistance de :

$$\lambda = \frac{KL}{r} \sqrt{\frac{F_y}{\pi^2 E}} = \frac{1.0 \times 6000}{63} \sqrt{\frac{345}{\pi^2 \times 200 \times 10^3}} = 1.26$$

$$C_r = \phi A F_y (1 + \lambda^{2n})^{-1/n} = \frac{0.9 \times 100000 \times 345 \times 10^3}{1000^2} \times (1 + 1.26^{2.68})^{-1/1.34}$$

$$C_r = 1420 \text{ kN} \geq 1000 \text{ kN}$$

5.2.4 Diagonales

Comme nous l'avons mentionné au début de ce chapitre, l'un des objectifs de ce programme expérimental était de valider le comportement des fusibles lorsque ces derniers sont ajoutés aux diagonales de contreventement. Plus précisément, nous avons procédé à l'essai de spécimens pour lesquels les fusibles étaient formés par l'agencement de quatre cornières dont la géométrie était similaire à celles utilisées pour le premier programme expérimental. Puisque notre étude portait essentiellement sur ces fusibles, nous avons procédé à l'essai de plusieurs spécimens, faisant varier certains paramètres pour chacun des essais. Les prochaines sections fournissent plus de détails concernant la description des essais.

Dans la pratique actuelle, certains ingénieurs proposent de réduire localement l'aire de la section afin de réduire sa résistance en traction et ce, en ayant recours à des ouvertures sur les parois du profilé tubulaire. Par cette pratique, les assemblages peuvent être conçus selon la charge en traction développée par la section réduite. Afin de vérifier cette pratique actuelle, nous avons décidé de réaliser certains essais suivant ces hypothèses.

Finalement, nous avons décidé de procéder à un essai sur une diagonale sans fusible qui servira de spécimen témoin. Ainsi, l'objectif des fusibles est de pouvoir réduire la charge en traction qui permettra d'engendrer des économies, et ce, sans altérer le comportement de la diagonale sous une sollicitation cyclique. En procédant à l'essai d'une diagonale sans fusible, nous définissions ainsi une référence quant à la réduction possible des efforts de traction et sur le comportement cyclique des diagonales avec fusible notamment quant à leur capacité de déformation.

À l'exception d'un essai, toutes les diagonales sont formées à partir d'un profilé tubulaire HSS102x102x4.8. Ces profilés provenant tous de la même coulée nous assurent que les propriétés de l'acier sont constantes pour tous les essais, et ainsi, réduit les

paramètres variants d'un essai à l'autre. Nous avons procédé à l'essai sur un profilé HSS127x127x4.8, qui a la particularité de ne pas respecté les restrictions du voilement local (rapport b/t). Ainsi, puisque la compression est reprise par le profilé tubulaire alors que la traction est reprise par le fusible, nous croyions qu'il y aurait la possibilité de se soustraire au rapport b/t .

Comme nous le mentionnions précédemment, nos essais ont porté sur une demi-diagonale. Par conséquent, les déformations doivent être calculées en fonction de la longueur de la diagonale complète, soit le double de la diagonale à l'essai.

5.2.4.1 Diagonale sans fusible (Spécimen no. 1CT)

Bien que sans fusible, l'essai sur cette diagonale était important à réaliser puisqu'il a fourni des informations pertinentes et importantes, notamment quant au comportement que les diagonales avec fusibles doivent imiter. De plus, cet essai a fourni des informations quant aux charges auxquelles les assemblages et les composantes structurales adjacentes devaient résister dans l'éventualité qu'aucun fusible n'a été ajouté. Ainsi, nous pouvions, dans l'éventualité qu'un fusible propose un comportement adéquat sous une charge cyclique, évaluer la portée des économies pouvant être envisagées.

La sélection du profilé tubulaire utilisé pour tous les essais a été fait en fonction de cet essai. Afin de définir un comportement de référence, nous avons procédé à un essai sous une charge cyclique qui a produit la rupture du spécimen choisi. Par conséquent, le profilé tubulaire devait avoir une résistance inférieure à la charge maximale du vérin qui était de 1000kN. La résistance à la rupture du HSS102x102x4.8 est estimée à 806kN ce qui est plus petit que la capacité du vérin de 1179kN projetée dans la diagonale.

5.2.4.2 Diagonale avec fusible formé d'ouvertures sur chacune des faces de la diagonale

En raison du surdimensionnement des composantes structurales adjacentes engendrées par la philosophie de la conception par capacité, certains ingénieurs ont préféré avantager l'approche de la construction conventionnelle. D'autres ont plutôt proposé des astuces afin de concevoir économiquement des structures ayant des ductilités de 2.0 et 3.0. Pour y parvenir, certains ont proposé de pratiquer des ouvertures sur chacune des faces du profilé tubulaire de manière à réduire sa section pour qu'elle corresponde à la charge de sollicitation en traction (T_f). Suivant cette hypothèse, ils supposent que la résistance en compression des diagonales n'est pas affectée puisque les ouvertures ne sont pratiquées que localement sur la paroi.

Plusieurs études antérieures⁶ ont démontré que cette pratique n'est pas une solution convenable, puisqu'une concentration de contraintes se développe aux droits des ouvertures provoquant une rupture prématurée lors de chargements cycliques. Néanmoins, puisque tous les spécimens proviennent de la même coulée, nous pensons qu'il est pertinent de démontrer, le comportement de ces diagonales lorsque soumises à des charges cycliques et ainsi pouvoir comparer adéquatement ces résultats avec les autres spécimens.

Nous proposons trois géométries d'ouvertures qui sont utilisées dans la pratique.

Tout d'abord et tel que montré à la Figure 5-4, certains ont proposé de pratiquer une ouverture circulaire sur chacune des faces, de manière à obtenir une aire réduite pouvant développer la charge en traction requise.

⁶ Pilot Testing on Ductile Yield Plate Fuses for HSS Braces Intended for Low-Rise Buildings, R.Tremblay, N.Bouatay, 1999

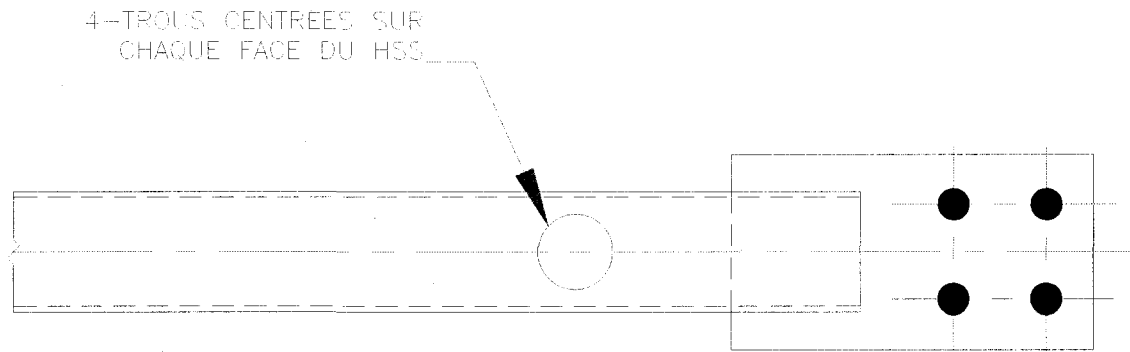


Figure 5-4 : Fusible formé d'ouvertures circulaires sur chaque face

Pour nos essais, le diamètre des trous est de 66mm. Ce diamètre est déterminé en supposant que la résistance en traction du fusible est équivalente à la résistance en compression ultime probable.

Ainsi, sachant que la résistance des assemblages est égale à :

$$C_{u,a} = 1.2 \left(A_g R_y F_y (1 + \lambda^{2n})^{-1/n} \right)$$

$$\lambda = \frac{KL}{r} \sqrt{\frac{R_y F_y}{\pi^2 E}}$$

et pour le profilé d'intérêt (HSS102x102x4.8) considérant un facteur d'élancement de $K = 0.7$ et une longueur de 6734mm, $C_{u,a} = 237kN$. Nous supposons ainsi que :

$$T_{u,F} = C_{u,a}$$

$$A_F R_y F_y = C_{u,a}$$

$$\therefore A_F = \frac{C_{u,a}}{R_y F_y} = \frac{237}{1.4 \times 345 \times 10^3} = 538 mm^2$$

$$D = \frac{A - A_F}{4t} = 66mm$$

D'autres ingénieurs ont remarqué que les ouvertures circulaires pouvaient affecter le comportement global de la diagonale. Ainsi, les ouvertures circulaires concentrent les contraintes au droit de l'ouverture et provoquent une rupture prématurée.

Afin de redistribuer la concentration de contraintes, il est possible de pratiquer des ouvertures ovalisées. De cette manière, suivant certaines hypothèses, les contraintes qui étaient concentrées en une zone locale se retrouvaient distribuées sur toute la longueur de la section réduite.

Afin de visualiser le comportement de ces diagonales, nous procéderons à des essais sur des diagonales pour lesquelles des ouvertures ovalisées ont été pratiquées. La Figure 5-5 présente la géométrie retenue pour ces essais.

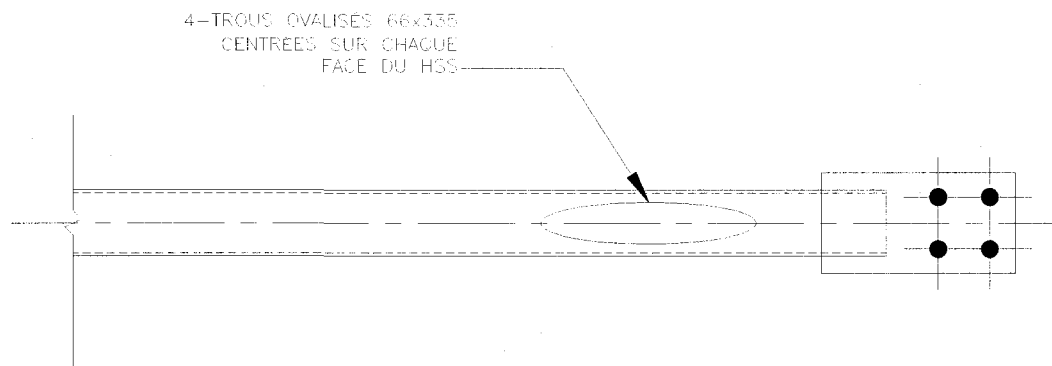


Figure 5-5 : Fusible formé d'une ouverture ovalisée sur chaque face

L'aire du fusible est la même que pour le fusible à ouverture circulaire. Par conséquent, la réduction de l'aire de la section est la même, et ainsi, l'ouverture à une hauteur de 66mm. La longueur de l'ouverture ovalisée est obtenue en supposant une déformation de 10%.

Sachant que l'élongation élastique de la diagonale sous la charge sismique est de

$$\delta_{\text{élastique}} = \frac{C_r L_d}{A_f E} \text{ et que l'élongation maximale anticipée est } \delta_{\text{max}} = 1.5 R_d R_o \delta_{\text{élastique}}, \text{ où}$$

1.5 est un facteur de sécurité, nous pouvons déterminer la longueur des ouvertures ovalisées suivant l'équation suivante :

$$\varepsilon_F = \frac{\delta_{\text{inelastique}}}{L_F}$$

$$L_F = \frac{\delta_{\text{max}} - \delta_{\text{élastique}}}{\varepsilon = 10\%}$$

Pour nos essais, la résistance en compression du HSS102x102x4.8 est de :

$$C_r = \phi A F_y (1 + \lambda^{2n})^{-1/n} = 167 \text{ kN}$$

Ainsi, considérant un contreventement à ductilité modérée,

$$\delta_{\text{élastique}} = \frac{C_r L_d}{A_f E} = \frac{167 \text{ kN} \times (2 \times 6734 \text{ mm})}{1630 \text{ mm}^2 \times 200 \text{ GPa}} = 6.90 \text{ mm}$$

$$\delta_{\text{max}} = 1.5 R_d R_o \delta_f = 1.5 \times 3.0 \times 1.3 \times 6.90 = 40.4 \text{ mm}$$

$$L_F = \frac{40.4 - 6.90}{\varepsilon = 0.10} = 335 \text{ mm}$$

Finalement, la dernière configuration d'ouvertures que nous avons étudié est composée de plusieurs petites ouvertures circulaires sur chacune des faces. Cette configuration nous a été proposée par Lainco qui a remarqué que cette configuration avait été retenue pour certains projets.

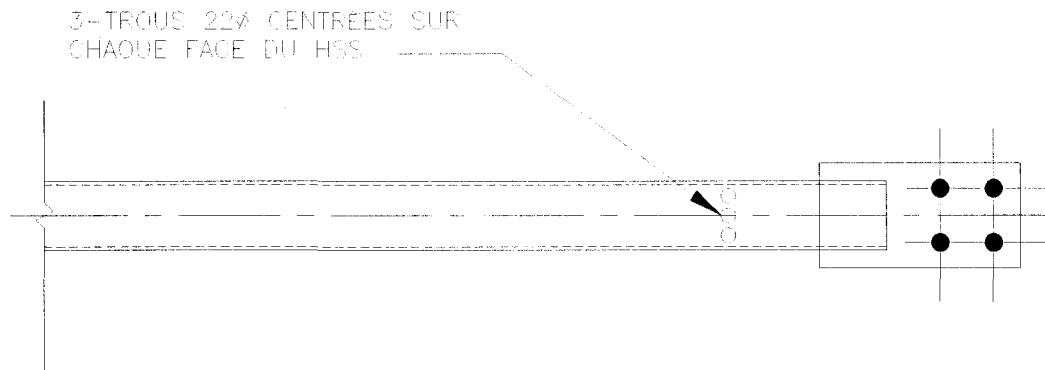


Figure 5-6 : Fusible formé de plusieurs ouvertures sur chaque face

L'aire réduite du profilé tubulaire est la même que pour les autres configurations, mais au lieu de recourir à une seule ouverture, nous avons pratiqué plusieurs petites ouvertures circulaires sur chaque face. De cette manière, puisque chacune des ouvertures est plus petite qu'une seule ouverture, il est possible que la concentration de contraintes au droit de chacune des ouvertures sera suffisamment réduite de manière à éviter une rupture prématurée ($\sigma \leq \sigma_u$).

5.2.4.3 Diagonale avec fusible formé de quatre cornières

Dans cette section, nous proposons de procéder à des essais sur des diagonales formées des mêmes profilés tubulaires mais pour lesquelles les fusibles ajoutés sont formés par l'agencement de quatre cornières. Ces diagonales étant le sujet principal de nos recherches, nous proposons d'effectuer des essais sur plusieurs diagonales en faisant varier certains paramètres afin de bien comprendre les phénomènes. Puisque tous les profilés tubulaires proviennent d'une même coulée et que toutes les cornières proviennent d'une même coulée, nous limitons les paramètres variant qu'à ceux que nous faisons volontairement varier. Les paragraphes suivants présenteront chacune des variantes étudiées.

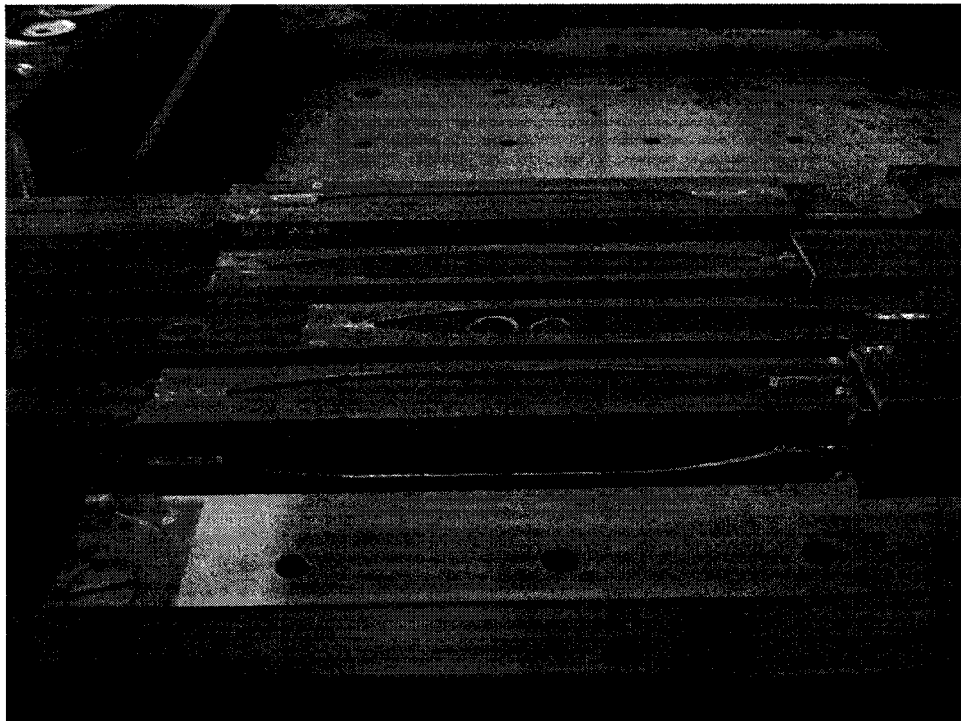


Figure 5-7 : Fusibles formés de quatre cornières

Conception 1 (Spécimen no. 5CT_1, 5CT_2, 5CC et 5DYN)

Dans cette variante, l'aire du fusible est obtenue suivant l'hypothèse que sa résistance doit être égale ou supérieure à la résistance de l'assemblage en compression. L'aire du fusible est donc obtenue à partir des relations suivantes.

$$C_{u,a.} = T_{r,F} = \phi A_F F_y, \text{ où } F_y = 300 \text{ MPa}$$

$$A_F = \frac{C_{u,a.}}{\phi F_y}$$

De plus, en raison du surplus de résistance du fusible en raison de l'écroutissage, nous avons supposé que les assemblages doivent résister à une charge en traction amplifiée par un facteur de 1.5 ($R_{SH} = 1.5$) qui est estimé à partir des essais du premier programme expérimental.

$$T_{u,F} = A_F R_{SH} R_y F_y, \text{ où } R_{y, fusible} = 1.3$$

Cette supposition a évidemment pour effet de réduire la portée des économies pouvant être envisagées.

La longueur du fusible est, en supposant une déformation de 10%, i.e. $\epsilon = 10\%$, obtenue des relations suivantes.

$$\delta_{élastique} = \frac{C_r \times 2L}{EA}$$

$$\delta_{\max} = 1.5 R_D R_O \delta_{élastique}$$

$$\epsilon_F = \frac{\delta_{inélastique}}{L_F} \rightarrow L_F = \frac{\delta_{inélastique}}{\epsilon_F} = \frac{\delta_{\max} - \delta_{dia}}{0.1}$$

Dans les relations précédentes, il est à remarquer que nous doublons la longueur de la diagonale, puisque les déformations proviennent de la diagonale complète alors que nos essais portent que sur une demi-diagonale.

Pour les spécimens étudiés, les équations précédentes donnent les résultats suivants :

$$C_{u,a} = T_{r,F} = \phi A_F F_y, \text{ où } F_y = 300 \text{ MPa}$$

$$A_F = \frac{C_{u,a}}{\phi F_y} = \frac{259 \text{ kN}}{0.9 \times 300 \text{ MPa}} = 957 \text{ mm}^2$$

$$T_{u,a} = A_F R_{SH} R_y F_y = 957 \text{ mm}^2 \times 1.5 \times 1.3 \times 300 \text{ MPa} = 560 \text{ kN}$$

Dans l'éventualité qu'aucun fusible n'ait été ajouté, le $T_{u,ass}$ aurait été de 865kN.

La longueur de la section réduite est donnée par :

$$\delta_{élastique} = \frac{C_r L_d}{A_F E} = \frac{167 \text{ kN} \times (2 \times 6734 \text{ mm})}{1630 \text{ mm}^2 \times 200 \text{ GPa}} = 6.90 \text{ mm}$$

$$\delta_{\max} = 1.5 R_d R_o \delta_f = 1.5 \times 3.0 \times 1.3 \times 6.90 = 40.4 \text{ mm}$$

$$L_F = \frac{40.4 - 6.90}{\epsilon = 10\%} = 335 \text{ mm}$$

La Figure 5-8 présente la géométrie de la diagonale tel que décrite dans cette section.

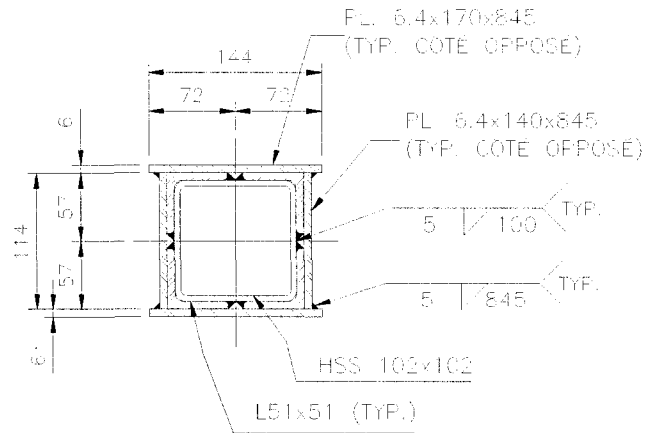


Figure 5-10 : Coupe A pour la conception 1

Les soudures entre le profilé tubulaire (HSS102) et les cornières formant le fusible (L51) ont été conçues de manière à résister à la charge de traction, incluant l'écroutissage $T_{u,ass} = 560kN$. Ainsi, les soudures de chacune des cornières devaient résister à une charge de 140kN ($560/4$).

Une fois les fusibles soudés, nous avons placé une boîte de confinement formée de quatre (4) plaques soudées autour du fusible. Cette boîte a pour but d'éviter le flambement des cornières lorsque la diagonale sera comprimée. La boîte recouvre entièrement les cornières. Afin qu'elle ne puisse pas glisser pendant les essais, nous l'avons fixée à l'une des extrémités par de petites soudures.

Comme montré sur la Figure 5-2, le fusible est placé au quart de la longueur de la diagonale. Ainsi, nous voulions nous éloigner du centre de la diagonale puisque que le flambement se produit à cet endroit sous une charge de compression. Nous avons aussi évité de nous approcher des assemblages pour ne pas affecter leur comportement.

Conception 2 (Spécimen no. 6CT et 6CC)

Dans la deuxième variante, les hypothèses quant à la détermination de l'aire des fusibles sont les mêmes que pour la conception 1. Comme pour la conception 1, la résistance des assemblages en traction est augmentée en supposant que le fusible a une résistance supérieure en raison de l'écrouissage. Nous avons considéré le même facteur, qui est estimé à partir des résultats du premier programme expérimental, de 1.5.

Nous voulions étudier les conséquences de faire varier la longueur du fusible. Ainsi, au lieu de supposer une déformation de 10%, nous supposons une déformation de 5%, ce qui a pour effet de doubler la longueur du fusible.

La Figure 5-8 et la Figure 5-10 sont aussi valables pour la conception 2. Par contre, le détail 1, montré sur la Figure 5-8 est montré à la Figure 5-11.

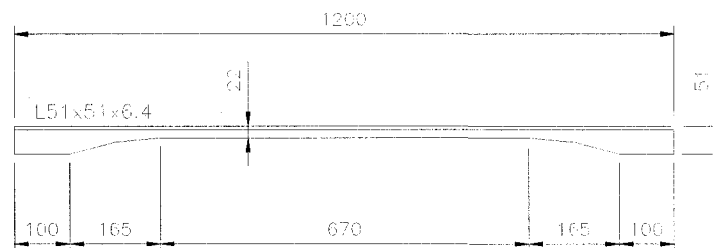


Figure 5-11 : Détail 1 pour la conception 2

Conception 3 (Spécimen no. 7CT et 7CC)

Contrairement à la conception 1 qui est très sécuritaire en considérant coefficient de tenue ϕ , R_y et d'écrouissage R_{SH} , la conception 3 vise à étudier le comportement des diagonales en établissant une borne inférieure. Ainsi, cette conception propose de calculer l'aire du fusible suivant l'hypothèse que la résistance de l'assemblage en compression est exactement égale à la résistance de l'assemblage en traction. Par cette hypothèse, l'aire des fusibles est obtenue à partir des relations suivantes.

$$C_{u,a} = T_{u,a}$$

$$T_{u,a} = A_F R_y F_y$$

$$\therefore C_{u,a} = A_F R_y F_y \rightarrow A_F = \frac{C_{u,a}}{R_y F_y} = \frac{259kN}{1.3 \times 300MPa} = 664mm^2$$

La longueur des fusibles est obtenue de la même manière que pour la conception 1 en supposant une déformation de 10%. Ainsi, la longueur des fusibles de la conception 3 est la même que celle de la conception 1. Cependant, l'aire du fusible est plus petite, ce qui réduit davantage la largeur des ailes des cornières formant le fusible.

La Figure 5-12 montre la géométrie de la conception 3.

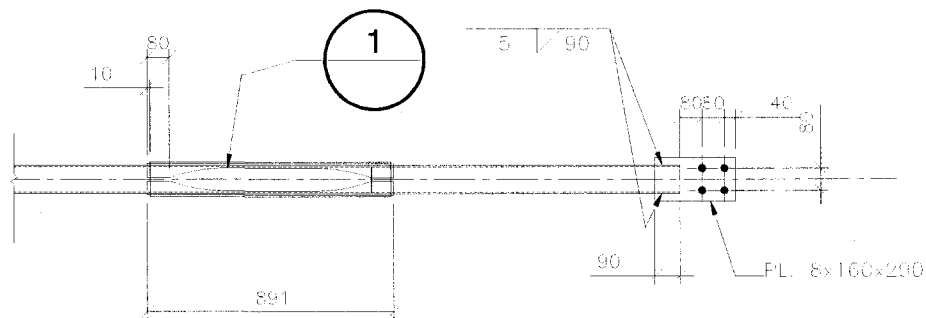


Figure 5-12 : Diagonale suivant la conception 3

Il est à remarquer qu'ayant négligé le surplus de résistance dû à l'écroutissage, les charges de traction transmises aux assemblages sont réduites ce qui explique que seulement quatre boulons sont suffisants en comparaison aux six boulons nécessaires aux conceptions 1 et 2.

Le détail 1 montré sur la Figure 5-12 est montré à la Figure 5-13.

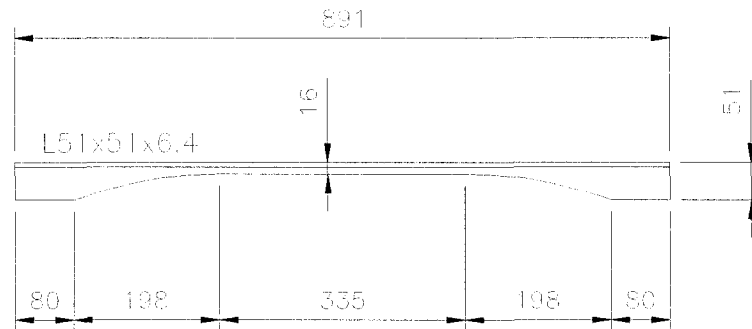


Figure 5-13 : Détail 1 pour la conception 3

Conception avec autre profilé tubulaire (Spécimen no. 8CT)

En plus de pouvoir envisager des économies, un autre avantage à utiliser les fusibles formés de quatre cornières peut être considéré. Comme nous le savons, pour une diagonale sans fusible, la compression produit le flambement de la diagonale à sa mi-portée et la traction qui en suit, dans le cas d'un chargement cyclique, produit la rupture au même point. Or, dans le cas des fusibles formés de l'agencement de quatre cornière, la compression est reprise par le profilé tubulaire qui flambe à mi-portée, et la traction est reprise par l'agencement des quatre cornières. Ainsi, en séparant la localisation des points de chargements, nous pouvons supposer une amélioration quant à la longévité de la diagonale sous un chargement cyclique.

Suivant cette hypothèse, nous sommes intéressés à vérifier si cette décomposition de déformations plastiques permettrait de nous soustraire à la vérification du voilement des parois (b/t).

Dans cette optique, nous proposons de procéder à un essai pour lequel, la diagonale choisie ne respecte pas les rapports de voilement des parois tel que prescrit à l'article 27 de la norme d'acier (CSA-S16).

Le profilé choisi est un HSS127x127x4.8 pour lequel le rapport des parois est obtenu des relations suivantes :

$$\frac{KL}{r} = \frac{0.7 \times 7075}{49.6} = 100$$

$$\frac{b}{t} = \frac{b-4t}{t} = \frac{127-4(4.78)}{4.78} = 22.56 > \frac{330}{\sqrt{F_y}} = \frac{330}{\sqrt{345}} = 17.77$$

La Figure 5-14 présente la géométrie de la diagonale ayant pour profilé tubulaire un HSS127x127x4.8. Le fusible est conçu suivant la conception no. 1.

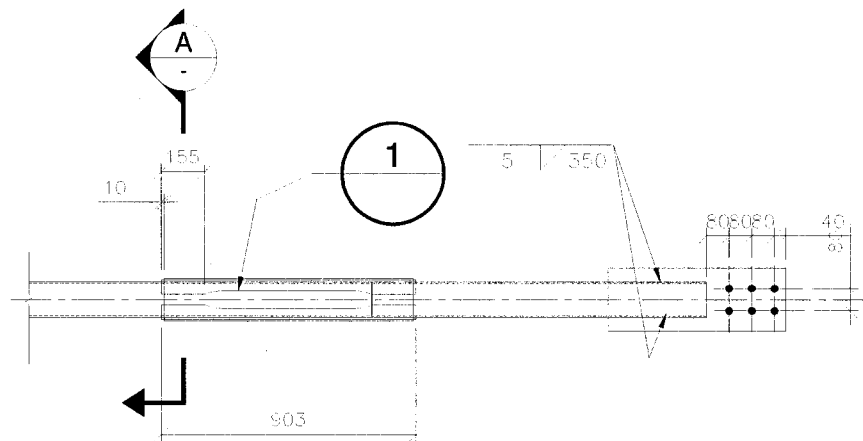


Figure 5-14 : Diagonale formé d'un HSS127x4.8

La Figure 5-15 présente le détail 1 montré sur la Figure 5-14.

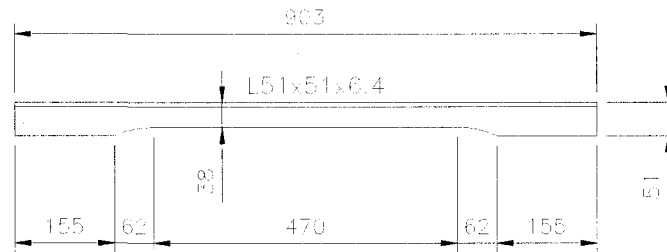


Figure 5-15 : Détail 1 pour le HSS127

La Figure 5-16 est la coupe A montrée à la Figure 5-16.

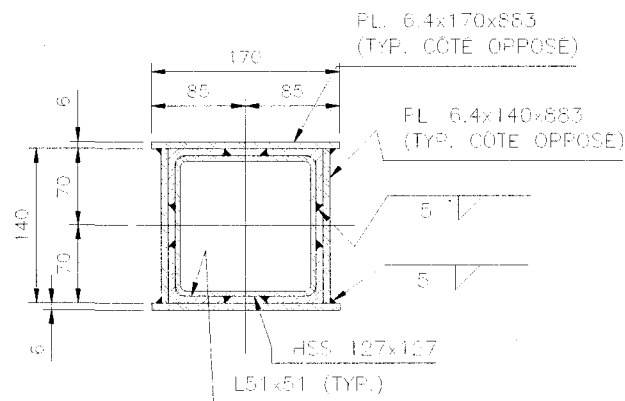


Figure 5-16 : Coupe A pour le profilé HSS127

5.3 Protocole de chargement

Trois (3) cas de chargement ont été définis dans le cadre du programme expérimental. Les protocoles de chargement ont été établis suite aux résultats obtenus par des analyses effectuées par d'autres⁷. Le premier cas de chargement est tel que montré à la Figure 5-17.

⁷ Logiciel OPENSEES, R.Tremblay, 2007. Modèle modifié à partir de celui de A. Agüero, C. Izvernari et R. Tremblay,

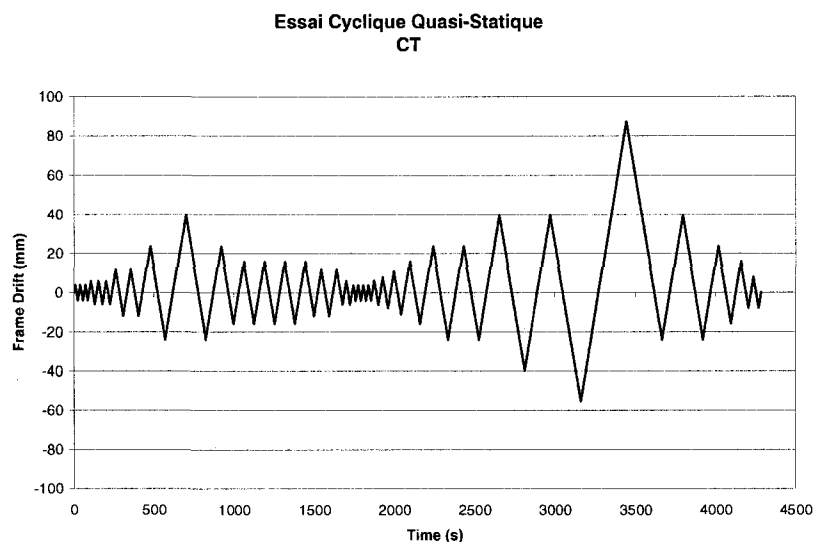


Figure 5-17 : Protocole de chargement cyclique CT

L'appellation CT désigne Cyclique-Traction, ce qui signifie que le signal est cyclique et que l'amplification de l'amplitude du signal se produit toujours sous une charge de traction dans la diagonale.

Cependant, puisque la direction des séismes est aléatoire et ne peut être prédite, il est important que les systèmes de résistance aux charges sismiques puissent résister aux mêmes charges mais en direction inversées. Le deuxième protocole de chargement, dont appellation est CC propose justement un signal cyclique pour lequel l'amplification de l'amplitude se produit lorsque la diagonale est soumise à une charge de compression. La Figure 5-18 présente le protocole de chargement CC.

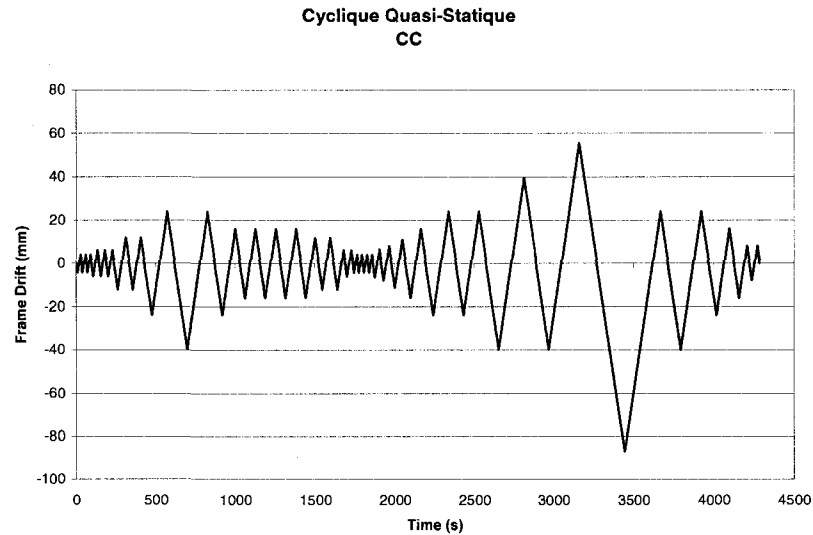


Figure 5-18 : Protocole de chargement cyclique CC

Les deux premiers cas de chargement soumettent les diagonales à des déplacements tel que ceux pour lesquels elles devront résister dans l'éventualité d'un séisme. Cependant, le rythme de déplacements est très lent en comparaison à la durée d'un séisme. Le vérin charge le cadre en se déplaçant à un taux de déplacement de 0.12mm/sec . Certains essais ont eu une durée de plus de 75 minutes, alors que la durée d'un séisme est généralement mesurée en terme de secondes.

Un protocole de chargement cyclique quasi-statique nous permet de bien visualiser le comportement de la diagonale et du fusible. Nous pourrions bien observer le flambement de la diagonale, et le comportement des fusibles sous la charge de traction. Ces essais nous permettent d'identifier les faits saillants de la détériorations des spécimens, et ce, jusqu'à la rupture.

Contrairement au chargement cyclique, un essai sous un chargement dynamique est de courte durée, et nous permet d'apprécier le comportement de la diagonale comme si

elle était soumise à un séisme réel. L'essai est trop rapide pour pouvoir bien identifier toutes les étapes de détériorations des spécimens. Par contre, il nous permet de visualiser le comportement de la diagonale lorsqu'elle est soumise à des charges renversées sous un rythme rapide.

Le signal dynamique retenu est montré à la Figure 5-19. Il s'agit d'un historique de déplacement non linéaire obtenu d'une analyse d'un bâtiment contreventé avec fusibles sous un enregistrement sismique.

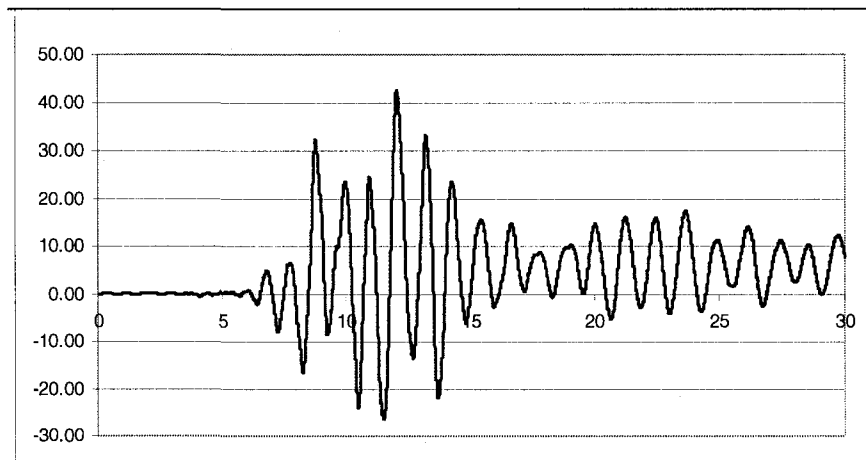


Figure 5-19 : Protocole de chargement dynamique (DYN)

5.4 Montage

5.4.1 Cadre d'essai

Comme nous avons mentionné précédemment, nous avons utilisé les colonnes déjà disponible au laboratoire et nous avons commandé de nouvelles poutres afin d'avoir une portée de 6000mm.

La Figure 5-20 présente le cadre d'essai utilisé pour ces essais.

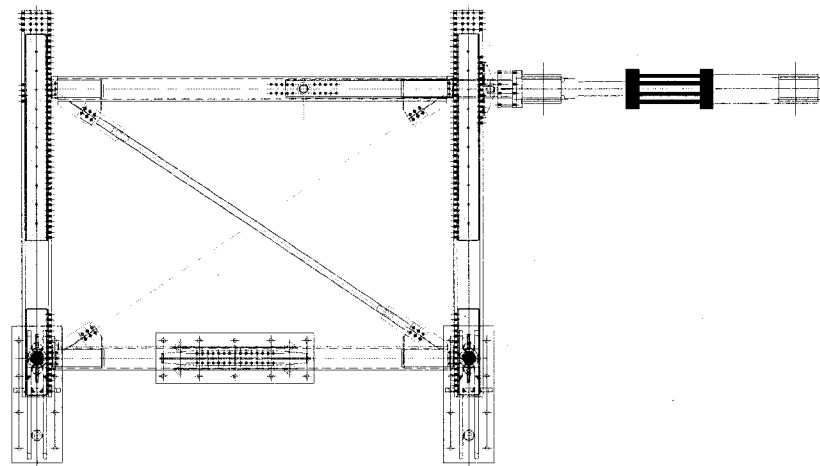


Figure 5-20 : Cadre d'essai

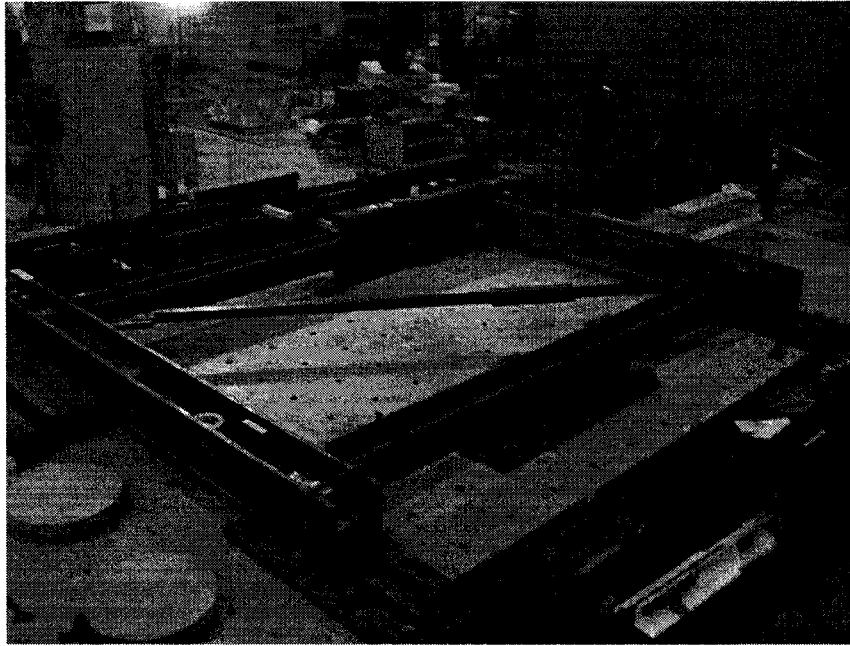


Figure 5-21 : Cadre d'essai

Bien que nous ayons vérifié que nous n'endommagerions pas les colonnes sous les cas de chargements retenus, nous avons néanmoins évité de charger les colonnes. Ainsi, et comme le montre la Figure 5-22, nous avons opté pour des goussets qui n'étaient connectés qu'à la poutre.

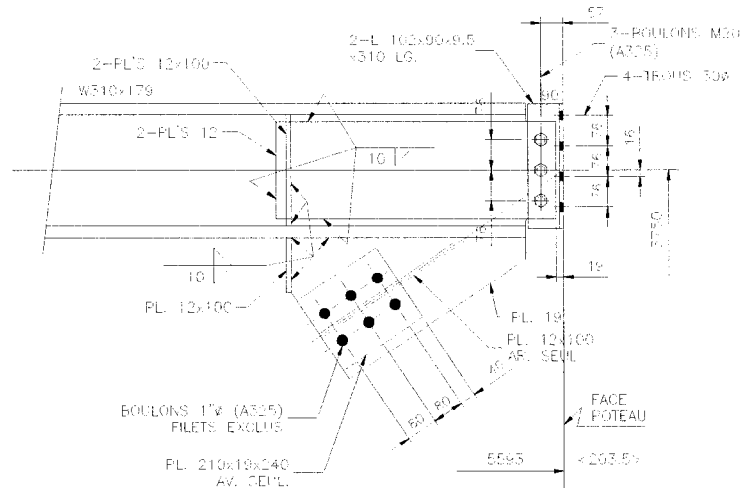


Figure 5-22 : Assemblage poutre-diagonale

Le gousset et les assemblages colonne-poutre ont été conçus pour la charge maximale pouvant être développée par le vérin, soit 1000kN horizontal.

Tous les assemblages réalisés lors de l'érection du cadre sont boulonnés. La majorité des assemblages n'ont nécessité qu'un serrage standard. Cependant, l'assemblage des diagonales aux goussets est réalisé suivant un serrage contrôlé. De cette manière, nous éliminons les possibilités de glissement entre la diagonale et le gousset. Puisque nous mesurons, à l'aide du potentiomètre à corde, l'élongation des diagonales entre les goussets, un glissement dans l'assemblage aurait pu fausser les résultats mesurés.

5.4.2 Essais préliminaires

En théorie, à moins de considérer un cadre rigide ayant des assemblages adéquats pour reprendre la flexion, un cadre sans diagonale est un système instable qui permet une déflexion horizontale sous une charge dans cette direction. Autrement dit, le cadre rectangulaire, devient un parallélogramme lorsque soumis à une charge horizontale. En réalité, la friction entre les pièces formant le cadre crée une résistance à la production du parallélogramme. Un montage adéquat du cadre exige ainsi que la résistance

enregistrée de la friction soit minimale lors d'un essai sans diagonale.

Nous avons ainsi entrepris une série d'essais sur le cadre sans diagonale afin d'évaluer le frottement dans le cadre et de vérifier qu'il était possible d'appliquer les déformations voulues. Nous avons procédé à des essais cycliques à très basse vitesse, et ce en contrôle de déplacement, faisant varier la course du cadre de 5mm à 87mm, à partir desquelles, nous avons enregistré la charge développée par le vérin pour obtenir ce déplacement. La Figure 5-23 présente les résultats obtenus pour ces essais.

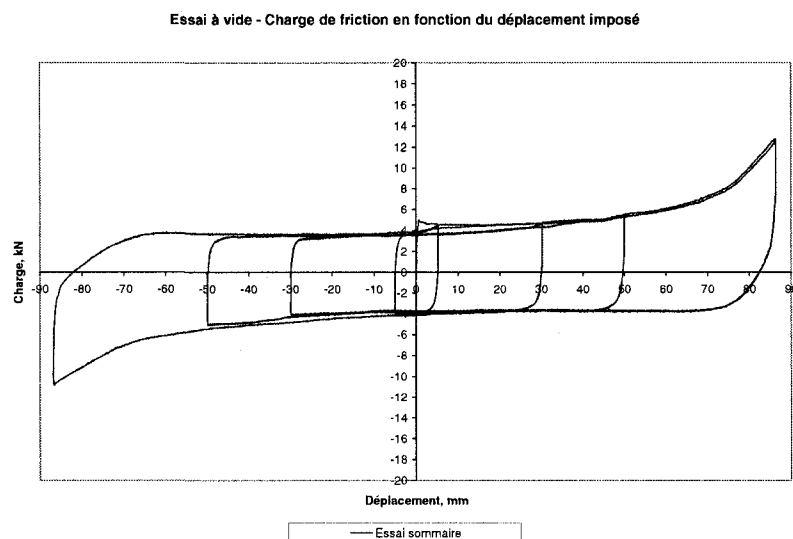


Figure 5-23 : Essais sur la cadre à vide

Pour un déplacement de 87mm, la charge de friction développée dans le cadre ne dépassait pas 15kN. De plus, il est à remarquer qu'à l'exception d'un cycle, tous les cycles des protocoles de chargement imposent un déplacement de moins de 60mm. En observant la Figure 5-23, un déplacement de 60 mm, une charge de friction maximale de 6kN sera induite dans le cadre. Ces résultats indiquent que le montage du cadre est adéquat, puisque les charges auxquelles les diagonales sont soumises sont nettement

supérieures. Pour ainsi dire, nous estimons que la rupture de certaines diagonales se produira lorsque le protocole de chargement imposera un déplacement de 87mm, ce qui correspondra, suivant nos hypothèses, à une charge imposée par le vérin d'environ 500kN. Par conséquent, la charge de 15kN induite par la friction ne représente une source d'erreur de 3% au maximum, ce qui est jugé acceptable dans ce contexte.

5.4.3 Instrumentations

Le vérin est en soit une source d'information quant au déroulement de l'essai. En effet, la poussée du vérin est contrôlée par déplacement suivant le signal cyclique implémenté au système. Le système d'acquisition mesure ainsi la charge développée par le vérin pour accomplir le déplacement désiré. Déjà, nous pouvions tracer une courbe charge-déplacement qui nous informait du comportement général du cadre. Cependant, le déplacement enregistrait aussi le glissement des boulons dans les assemblages poutres-colonnes, ainsi que toutes autres sources d'erreurs. Étant soucieux de bien comprendre le comportement de la diagonale, nous voulions mesurer adéquatement l'élongation de la diagonale.

Afin de mesurer l'allongement de la diagonale, nous avons placé un potentiomètre à corde, installé sur les goussets, pour lequel la corde était placée parallèlement à la diagonale (Figure 5-24). Bien que nous mesurons l'allongement entre les goussets, alors que nous sommes intéressés par l'allongement dans la diagonale, nous supposons que cette approche est juste, puisque l'assemblage des diagonales aux goussets a été réalisé suivant les indications d'un serrage contrôlé, ce qui limite les possibilités de glissement.

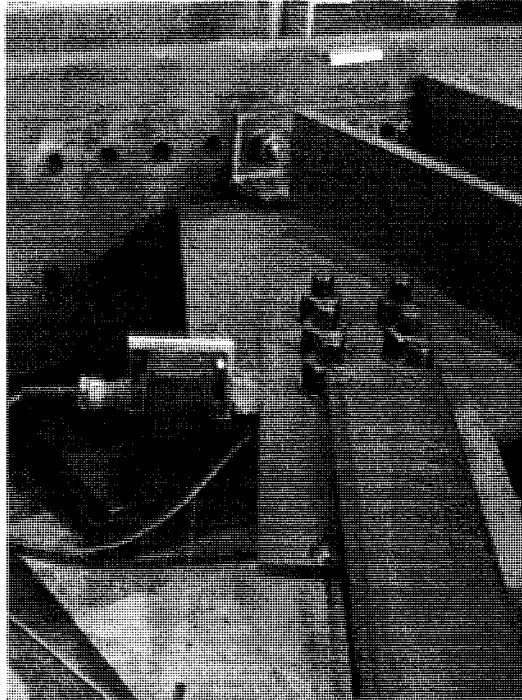


Figure 5-24 : Potentiomètre à corde installé sur le gousset

Nous étions aussi intéressés à connaître l'allongement des fusibles, par rapport à l'allongement total de la diagonale. Nous supposons en effet que l'allongement de la diagonale se produira principalement dans les fusibles. Afin de mesurer l'allongement des fusibles, nous avons installé deux potentiomètres à corde mesurant l'allongement des fusibles, soit un potentiomètre à corde sur la face horizontale et un autre sur la face verticale des fusibles (Figure 5-25). De plus, l'information que nous pourrions obtenir de ces potentiomètres servira de comparaison aux essais du premier programme expérimental.

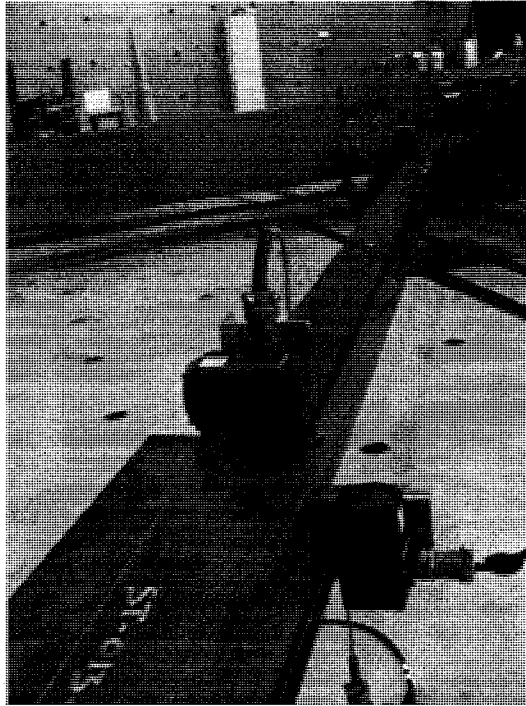


Figure 5-25 : Potentiomètres à corde sur fusible

Finalement, nous avons placé un potentiomètre à corde mesurant la déformation verticale au centre de la diagonale induite par le flambement. Le potentiomètre à corde était fixé à un support en porte-à-faux placé quelques mètres plus haut, et la corde est relié à la diagonale au moyen d'un fil métallique.

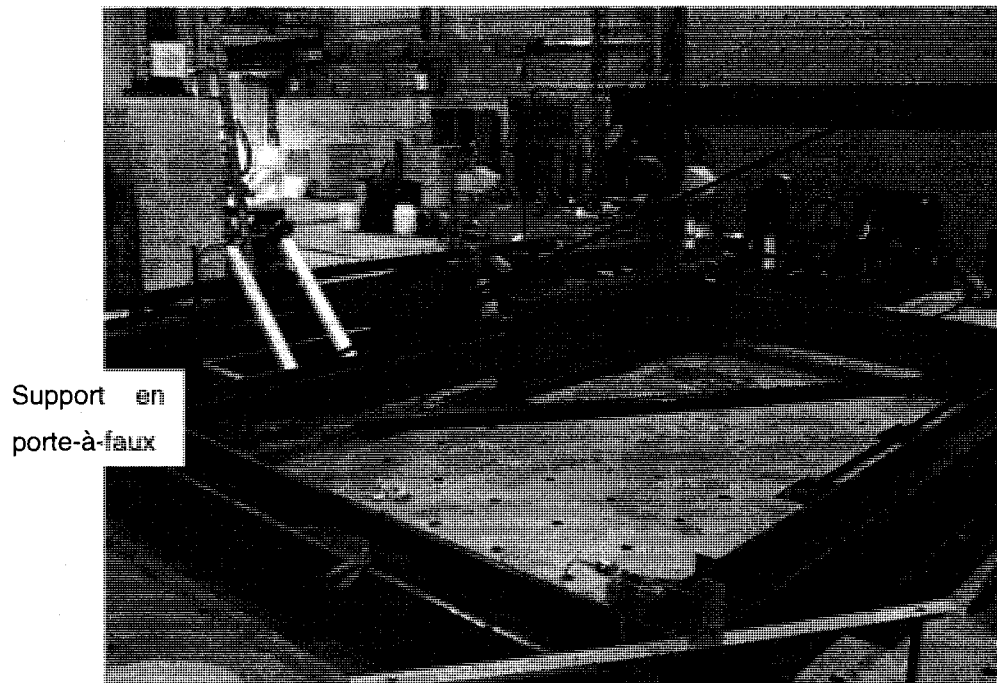


Figure 5-26 : Potentiomètre verticale

Il est à noter que pour une diagonale ayant des fusibles formés par l'agencement des quatre cornières, nous avons installé des jauges afin de valider que le comportement des cornières, lorsque agencées au profilé tubulaire, était comparable à celui des essais traitant les diagonales seulement.

5.4.4 Préparation des spécimens

En plus de l'instrumentation mesurant l'allongement total des cornières formant le fusible, nous voulions aussi nous assurer que l'allongement des cornières était uniforme sur toute leur longueur.

Nous avons marqué les cornières à un intervalle de 20mm. En marquant ainsi les cornières, nous pourrions, une fois l'essai complété, remesurer l'espacement entre les lignes marquées et statuer de l'allongement à chacun des points marqués. De plus,

nous avons profité du marquage des spécimens pour mesurer la largeur des ailes des cornières afin de calculer l'aire des sections et ainsi pouvoir prédire la rupture des spécimens.

5.5 Résultats

Dans cette section, nous décrivons les résultats obtenus. Tout d'abord, nous présenterons les observations générales que nous avons notées lors des essais. Nous décrirons ensuite chacun des essais en présentant les résultats compilés et les graphiques. Finalement, nous compléterons cette section en comparant les différents essais afin de pouvoir tirer des conclusions pertinentes englobant tous les essais.

5.5.1 Observations générales

Les plaques aux extrémités des diagonales qui servaient d'assemblages aux goussets ont une excentricité par rapport à l'axe centrale des profilés tubulaires. Cette excentricité a, pour le premier essai, créé un flambement vers le sol, qui s'est soldé par l'interruption de l'essai, puisque la diagonale fléchie atteignait le niveau du sol. Pour remédier à cette situation, nous avons forcé le flambement vers le haut en assemblant les diagonales à l'envers, c'est-à-dire, en produisant une excentricité forçant la diagonale à flamber vers le haut.

Les diagonales ayant des ouvertures pour fusible n'ont pas su démontrer un comportement adéquat. Pour chacun des essais employant ce type de fusible, nous avons noté une rupture prématurée au droit des ouvertures, à des déformations très petites. Autant les essais cycliques et que les essais dynamiques indiquent des résultats devant être considérés par l'ingénieur-concepteur avant d'utiliser de tels fusibles.

Contrairement aux fusibles formés d'ouvertures, les fusibles formés par l'agencement de quatre cornières ont démontré un comportement prometteur. Ainsi, les diagonales

formées de ces fusibles ont exhibé un comportement s'agencant au comportement de la diagonale sans fusible. Bien entendu, et comme nous l'avons prévu, la charge de rupture des diagonales en traction pour lesquelles un fusible est introduit est moindre par rapport à la diagonale sans fusible, ce qui corrobore nos hypothèses et ainsi, confirme la possibilité de produire des économies.

De plus, nous avons émis l'hypothèse qu'il y aurait possibilité de nous soustraire à la vérification des critères visant à éviter une rupture par voilement local des parois (rapport b/t). Les essais ont démontré que l'utilisation des fusibles formés par les cornières ne permet pas d'éviter leurs applications.

Nous n'avons, jusqu'à présent, dressé qu'un portrait global du comportement des spécimens, nous présenterons dans les prochains paragraphes, le comportement de chacun des spécimens, en agrémentant nos discussions de graphiques et de résultats d'essai.

5.5.2 Observations particulières sur chacun des essais

Pour chacun des spécimens, nous avons tracé la courbe du ratio de la charge P sur la charge P_y en fonction du ratio de déplacement de la diagonale δ par rapport à δ_y .

Les valeurs P correspondent à la charge reprise par la diagonale sous les poussées du vérin, ($P = V/\cos \theta$), où V est la cellule de charge du vérin, θ est égal à 32° .

La valeur de P_y est obtenue suivant l'équation :

$$P_y = A_{HSS} \times F_{yHSS}$$

La limite élastique (F_{yHSS}) des profilés tubulaires est équivalente à 350MPa et est la valeur nominale décrite dans le code. Nous avons utilisé cette valeur nominale puisque

les protocoles de chargement ont été établis suivant une valeur nominale.

Afin d'obtenir l'aire du profilé tubulaire, nous avons mesuré les parois des tubes des différents spécimens. À partir de ces résultats, nous pouvons évaluer l'aire des spécimens suivant l'équation suivante :

$$A_{HSS} = A_{Handbook} \times \frac{t_{mesuré}}{t_{design}} = 1790 \times \frac{t_{mesuré}}{4.78}$$

Le Tableau 5-1 présente les valeurs considérées pour les différents essais. L'épaisseur des parois a été mesurée à chacune des extrémités des profilés tubulaires (t_1 et t_2). Nous avons ainsi considéré la valeur moyenne des deux (2) valeurs (t_{moy}).

Essai	Tube	t_1	t_2	t_{moy}	A	P_y
		mm	mm	mm	mm ²	kN
5CT	HSS102x102x4.8	4.51	4.54	4.53	1,695	593
5CT_1	HSS102x102x4.8	4.62	4.59	4.61	1,724	604
5CC	HSS102x102x4.8	4.40	4.54	4.47	1,674	586
6CT	HSS102x102x4.8	4.50	4.52	4.51	1,689	591
6CC	HSS102x102x4.8	4.45	4.45	4.45	1,666	583
7CT	HSS102x102x4.8	4.52	4.47	4.50	1,683	589
7CC	HSS102x102x4.8	4.59	4.59	4.59	1,719	602
8CT	HSS127x127x4.8	4.24	4.25	4.25	1,590	556

Tableau 5-1 : Résumé de données pour les diagonales
ayant pour fusible l'agencement de quatre cornières

Il est cependant à noter que les parois n'ont pas été mesurées pour les profilés

tubulaires ayant pour fusible des ouvertures. Par conséquent, nous avons utilisé une aire équivalente, correspondant à la moyenne des valeurs obtenues des autres essais, et qui correspond à 1693mm².

Le déplacement δ de la diagonale est obtenu à partir des résultats enregistrés par le potentiomètre à corde placé entre les goussets. Pour sa part, le paramètre δ_y est obtenu de l'équation suivante :

$$\delta_y = \frac{F_{y_{HSS}}}{E} \times L_{C/C_{dia}} = \frac{350}{200000} \times (3750^2 + 6000^2)^{1/2} = 12.38mm$$

5.5.2.1 Sans fusible, 1CT

L'essai sur la diagonale sans fusible est un spécimen témoin. Il établit une référence et une base de comparaison pour les essais ayant des fusibles. De plus, il permet d'établir la charge en compression que doivent atteindre tous les spécimens, étant donné que les fusibles sont conçus de manière à travailler en traction seulement.

La Figure 5-27 présente l'hystérésis du comportement sous un chargement cyclique.

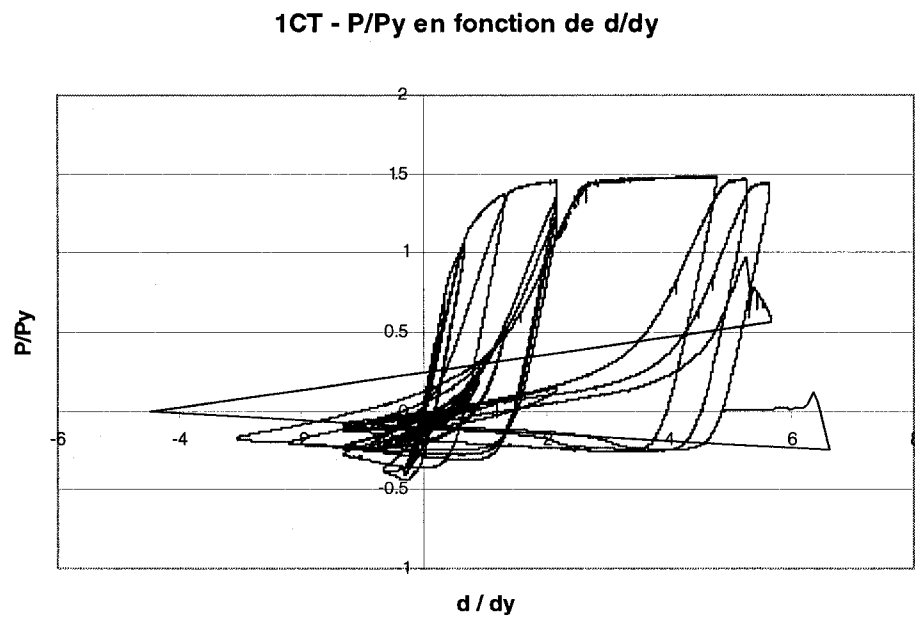


Figure 5-27 : 1CT – P/P_y en fonction de δ/δ_y

La charge maximale en traction transmise par le vérin est de 738kN ce qui correspond à $1.48P_y$. De plus, ceci correspond à une charge dans la diagonale de 870kN ($738/\cos \theta$).

La charge maximale en compression transmise par le vérin est quant à elle égale à 217kN ce qui correspond à $0.43P_y$, ce qui correspond à une charge de 256kN dans la diagonale.

Tel que prévu, la diagonale sans fusible a résisté au signal cyclique décrit précédemment. La rupture n'étant pas atteinte à la fin du protocole, nous avons décidé d'incrémenter le chargement en traction jusqu'à la rupture du spécimen qui est survenu, suivant une elongation de $5.64\delta_y$ dans la diagonale.

C'est à partir de la Figure 5-27 que nous pourrions évaluer l'admissibilité des fusibles lors de la conception.

La Figure 5-28 montre le spécimen lorsqu'il est soumis à une charge de compression. On remarque que le flambement est forcé vers le plafond.

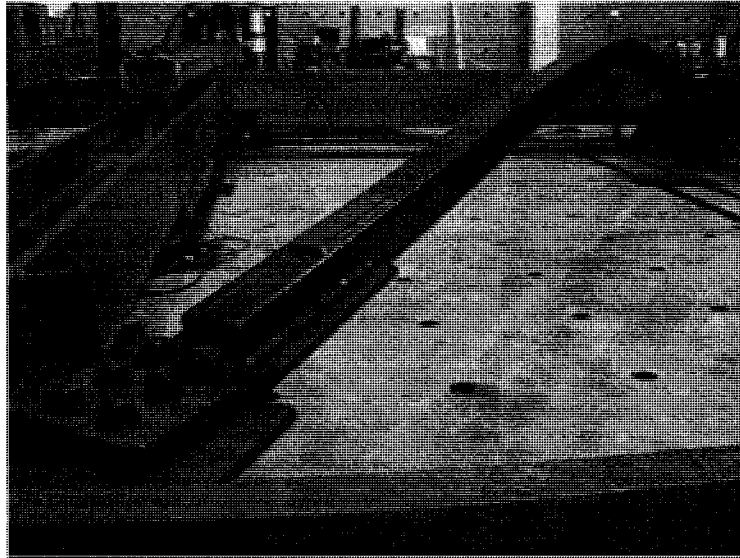


Figure 5-28 : Élancement de la diagonale sans fusible

À mesure que la force de compression était augmentée, nous remarquons le voilement local des parois à sa mi-longueur (Figure 5-29)

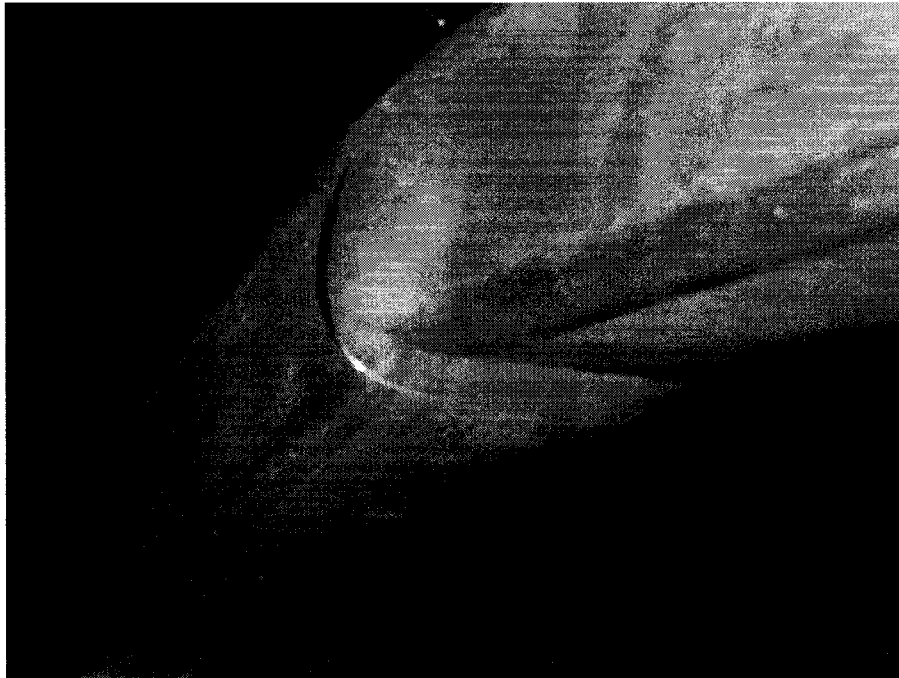


Figure 5-29 : Voilement local de la diagonale à mi-longueur

Suivant le voilement locale, la Figure 5-30 montre le déchirement du profilé tubulaire.

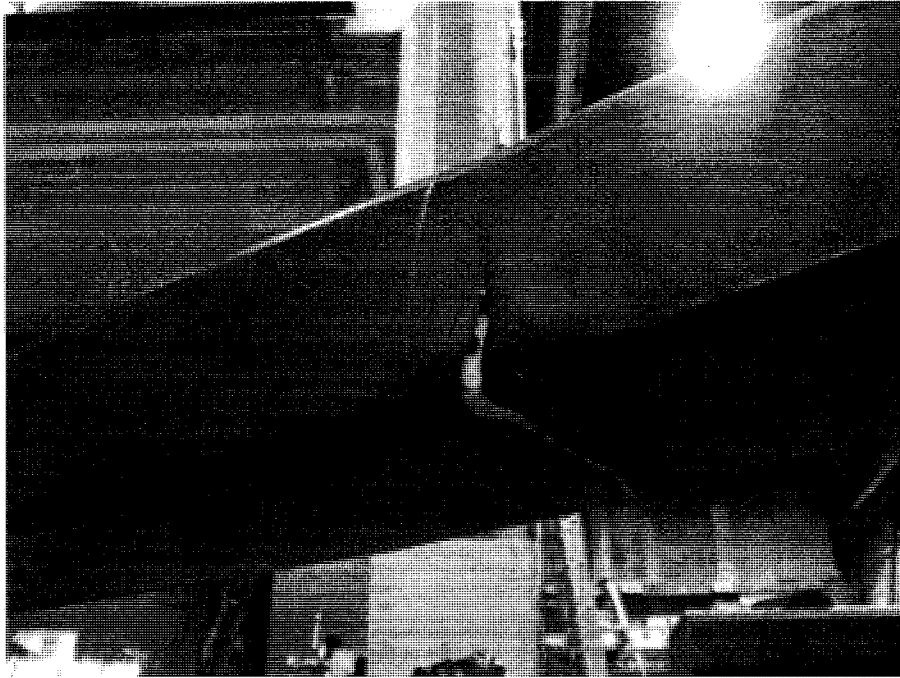


Figure 5-30 : Début du déchirement à la suite du voilement local

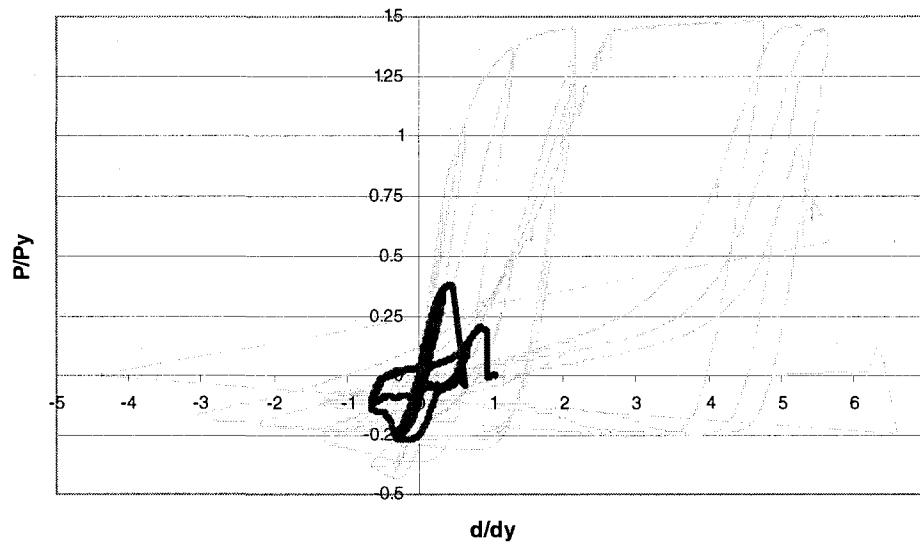
Finalement, la Figure 5-31 montre le spécimen après la rupture.



Figure 5-31 : Rupture de la diagonale

5.5.2.2 Ouverture singulière circulaire sur chacune des faces, 3CT

Nous avons ensuite procédé à l'essai sur la diagonale ayant une ouverture circulaire sur chacune de ses faces. Comme nous le prévoyions, le comportement de ces diagonales est nettement inadéquat sous un chargement cyclique. En effet, la charge reprise par la diagonale avant que la rupture ne se produise est de 267kN en traction et 189kN en compression, ce qui correspond aussi à $0.38P_y$ en traction et à $0.27P_y$ en compression. Bien qu'en observant ces charges, certains pourront indiquer que ces ouvertures permettent une économie, étant donné que les charges sont réduites, il devient cependant évident que ces diagonales sont périlleuses à utiliser lorsque nous observons la Figure 5-32.

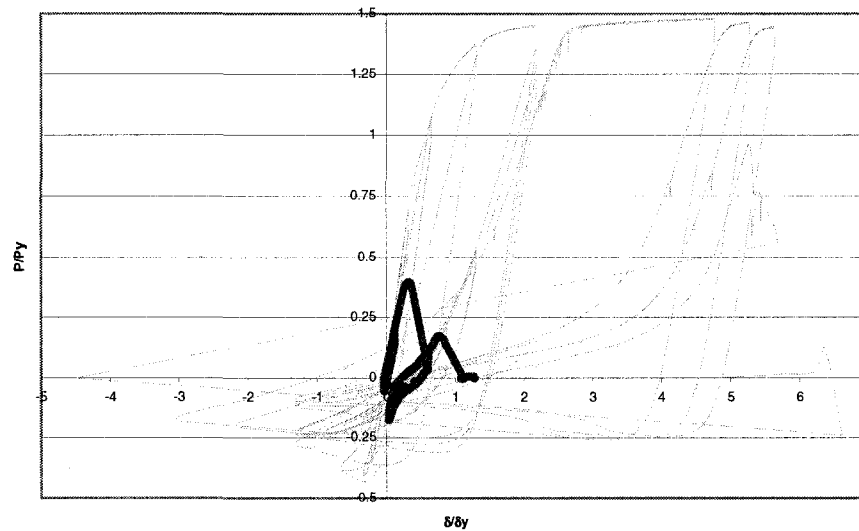
1CT vs. 3CT- P/P_y en fonction de d/d_y Figure 5-32 : 3CT – P/P_y en fonction de δ/δ_y

En effet, nous observons immédiatement que ces diagonales subissent une rupture prématurée en traction lorsque soumises à un chargement cyclique. La diagonale n'a pu subir qu'une élongation de $0.9\delta_y$ avant sa rupture ($5.64\delta_y$ pour la diagonale sans fusible).

5.5.2.3 Ouvertures multiples circulaires sur chacune des faces, 2CT

Nous avons ensuite soumis le même chargement cyclique à un profilé tubulaire sur lequel trois ouvertures circulaires ont été pratiquées sur chacune de ses faces.

Ce profilé a exhibé le pire comportement sous une charge cyclique. La Figure 5-33 présente l'hystérésis du comportement sous un chargement cyclique.

1CT vs. 2CT- P/P_y en fonction de δ/δ_y Figure 5-33 : 2CT – P/P_y en fonction de δ/δ_y

Nous remarquons rapidement que ce spécimen n'a su résister qu'à très peu de cycles avant de subir la rupture. La diagonale n'a pu subir qu'une élongation de $0.85\delta_y$ avant sa rupture. La diagonale a résisté à $0.40P_y$ en traction et $0.18P_y$ en compression.

La Figure 5-34 et la Figure 5-35 montrent la rupture du spécimen 2CT.



Figure 5-34 : Rupture du spécimen 2CT

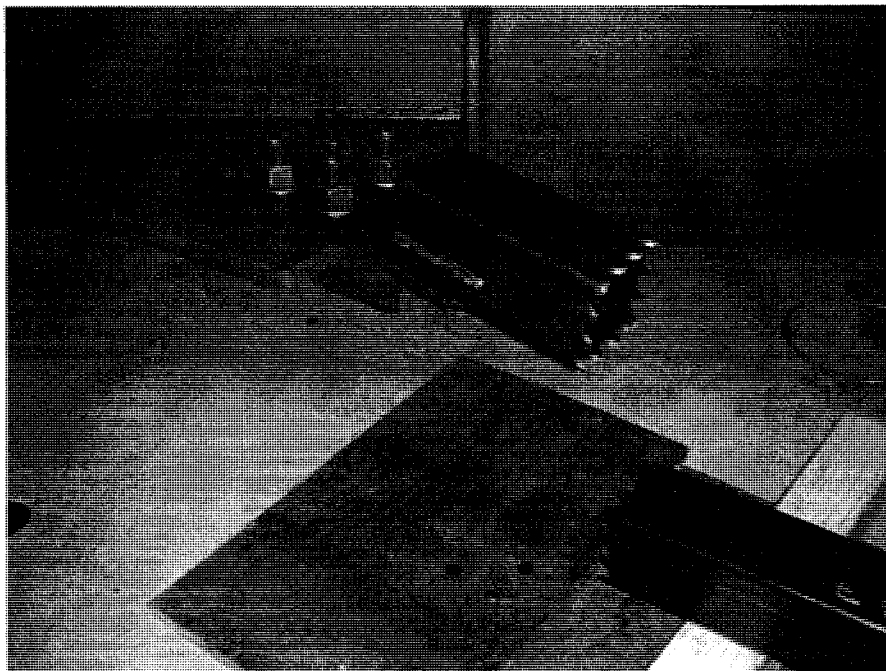


Figure 5-35 : Rupture du spécimen 2CT

5.5.2.4 Ouverture singulière elliptique sur chacune des faces, 4CT

Le spécimen ayant une ouverture elliptique sur chacune des faces est celui ayant le meilleur comportement dans le groupe des profilés avec ouvertures. Comme le montre la Figure 5-36, il a résisté à plus de cycles que les spécimens ayant des ouvertures. Ce spécimen a subi une élongation de $1.4\delta_y$, ce qui surpasse les résultats obtenus des autres profilés avec ouvertures, mais qui demeure loin des résultats obtenus du spécimen témoin, $5.64\delta_y$.

1CT vs. 4CT- P/P_y en fonction de d/d_y

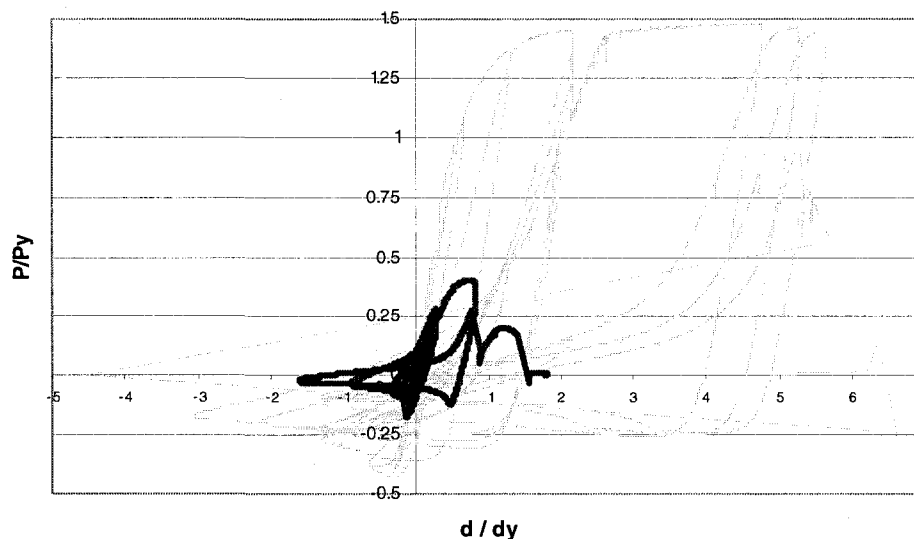


Figure 5-36 : 4CT – P/P_y en fonction de δ/δ_y

Le spécimen a résisté à une charge de 103kN en compression et 237kN en traction avant de subir la rupture, ce qui correspond à $0.40P_y$ en traction et à $0.17P_y$ en compression. En observant la Figure 5-36, nous remarquons que cette configuration ne saura suffisamment résister à un séisme puisque ces spécimens produiront une rupture prématurée, et ainsi rendront le système de résistance aux charges sismiques

rapidement inefficaces.

Par son ouverture elliptique, nous prévoyions que ce spécimen présente le meilleur comportement parmi les spécimens ayant pour fusible des ouvertures. Par conséquent, nous avons décidé de soumettre cette configuration à un protocole de chargement dynamique. La Figure 5-39 présente la charge imposée par le vérin en fonction du déplacement de la diagonale.

La Figure 5-37 montre le spécimen 4CT en préparation et la Figure 5-38 montrent la rupture du spécimen 4CT.

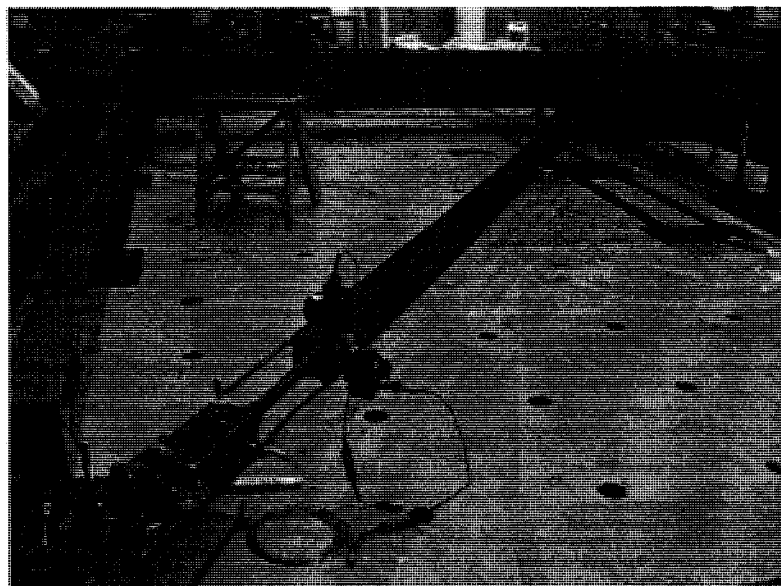


Figure 5-37 : Spécimen 4CT

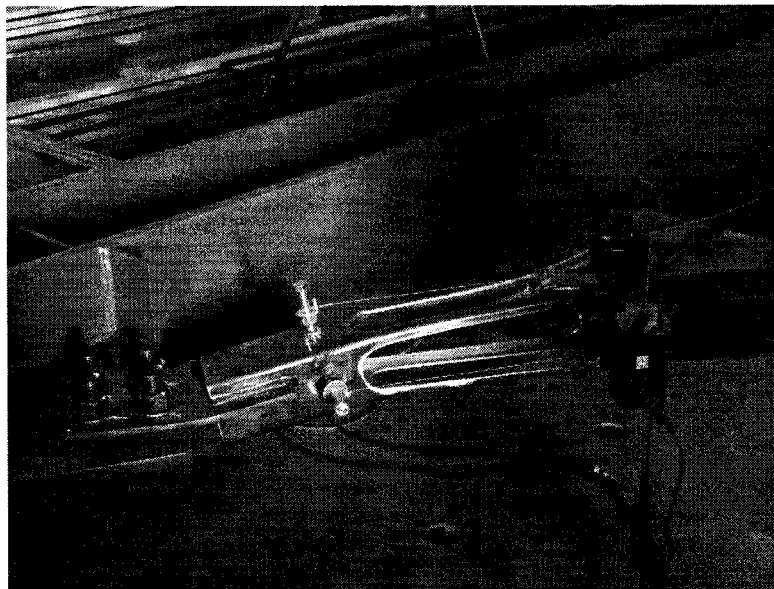
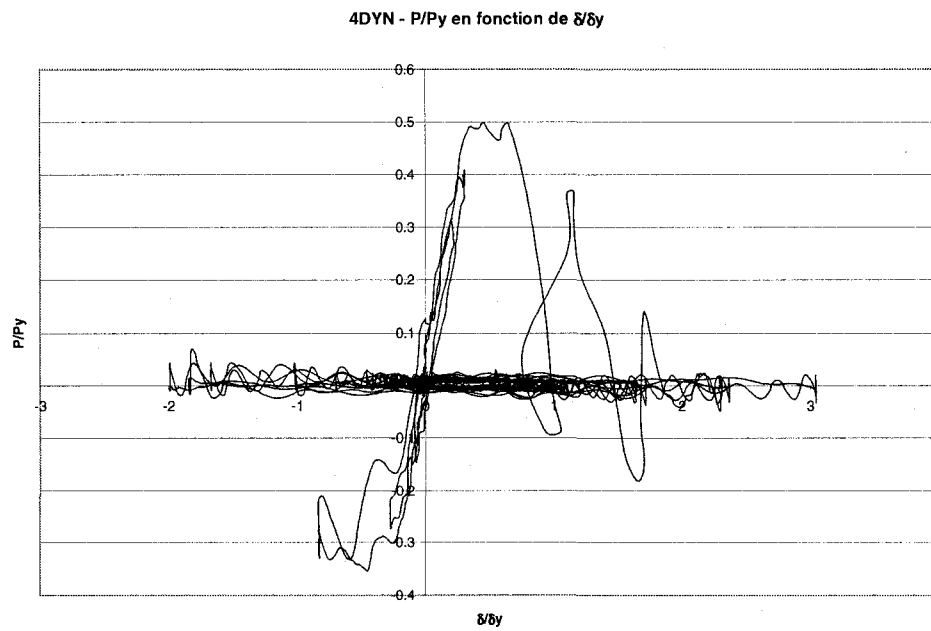


Figure 5-38 : Rupture du spécimen 4CT

5.5.2.5 Ouverture singulière elliptique sur chacune des faces, 4DYN

Figure 5-39 : 4DYN – P/P_y en fonction de δ/δ_y

5.5.2.6 Quatre cornières suivant la conception 1

Les prochains spécimens sont les spécimens pour lesquels nous porterons la majorité de notre intérêt. Tel que décrit précédemment, leur géométrie est composée de deux profilés tubulaires liés par l'agencement de quatre cornières.

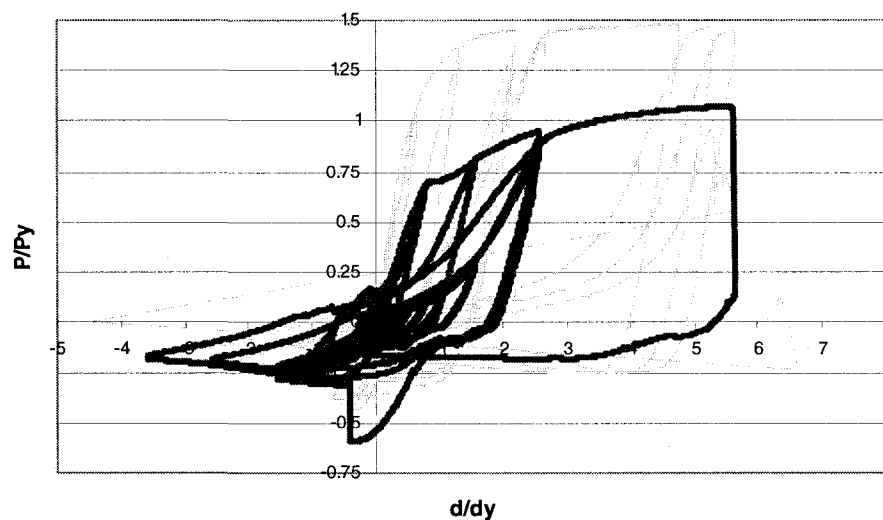
Cette section présente les spécimens pour lesquels une conception conservatrice a été suivie. Ainsi, les facteurs ϕ , R_y et R_{sh} ont été considérés.

Pour cette conception, nous avons procédé à l'essai de quatre spécimens. Deux de ces spécimens, ont été soumis à un chargement cyclique suivant le protocole de chargement commençant par une charge de traction. Le troisième spécimen a subi le protocole de chargement cyclique commençant par une charge compressive. Finalement, le quatrième spécimen a subi un chargement cyclique dynamique, afin de visualiser et comprendre le comportement de ces diagonales lorsque soumises à un séisme.

Nous avons décidé de procéder à deux essais sous un chargement cyclique débutant en traction puisque le premier essai a dû être interrompu en raison du flambage verticale de la diagonale qui dépassait le dégagement que nous avons prévu entre l'axe de la diagonale et le niveau de la dalle du laboratoire. Lorsque la diagonale a atteint le niveau du plancher, nous avons décidé de décharger la diagonale, de la déboulonner, et de l'installer de manière à ce que l'excentricité entre l'axe neutre du profilé tubulaire et la plaque servant à l'assemblage puisse forcer un flambage vers le plafond. De cette manière nous n'avons plus de limite quant au flambage des diagonales. C'est à partir de cette observation que nous avons décidé d'installer les autres diagonales de façon à toujours obtenir un flambement vers le haut. Néanmoins, puisque nous pouvions avoir modifié les résultats par notre intervention, nous avons décidé de procéder à un deuxième essai suivant le même protocole de chargement, mais en installant la diagonale convenablement.

Premier essai cyclique débutant en traction

La Figure 5-40 montre les résultats obtenus du premier essai en présentant la charge en fonction du déplacement. Nous remarquons que lorsque la charge de compression atteint 300kN, un déchargement sans déplacement se produit. En fait, il s'agit du moment où la diagonale touche le sol et que nous avons perturbé l'essai en déchargeant la diagonale afin de l'installer de manière à produire un flambement vers le haut.

1CT vs. 5CT- P/P_y en fonction de d/d_y Figure 5-40 : 5CT – P/P_y en fonction de δ/δ_y

Néanmoins, nous pouvons remarquer que le comportement de la diagonale sous un chargement cyclique s'approche davantage du comportement du spécimen témoin. En effet, la diagonale a pu supporter un plus grand nombre de cycles tel que montré à la Figure 5-40. L'élongation est de l'ordre de $5.65\delta_y$ alors qu'elle était de $5.64\delta_y$ pour le spécimen témoin.

Nous remarquons que la résistance du spécimen 5CT est de $1.07P_y$ en traction. Nous remarquons que la résistance en traction de la diagonale à l'essai est, tel que prévue, nettement réduite en comparaison au profilé témoin qui est de $1.48P_y$.

Nous avons, comme pour le premier programme expérimental, mesuré les cornières avant et après l'essai.

Plus précisément, nous avons mesuré la largeur des ailes à un intervalle de 20mm, et ce, afin que nous puissions déterminer la section la plus réduite, et ainsi, prédire la rupture.

Nous avons tracé des lignes sur le spécimen à un intervalle de 20mm. Nous avons ensuite remesuré la distance entre les lignes après l'essai. Nous pouvions ainsi déterminer si l'élongation était constante sur toute la longueur du fusible. La Figure 5-41, la Figure 5-42, la Figure 5-43 et la Figure 5-44 montrent les résultats obtenus.

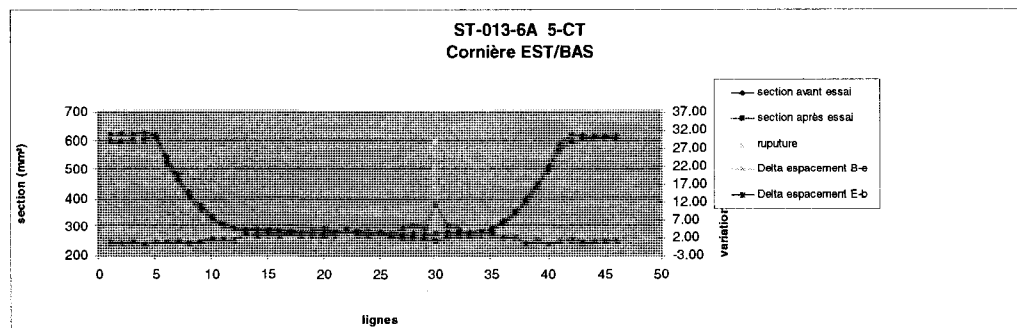


Figure 5-41 : Mesures sur la cornière à la position Est/Bas

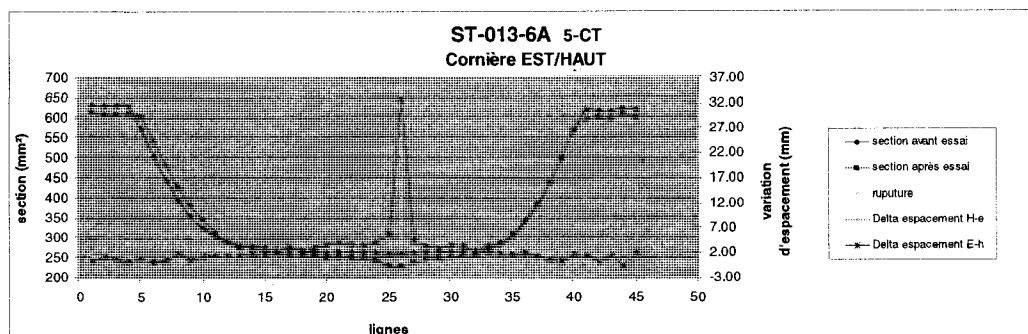


Figure 5-42 : Mesures sur la cornière à la position Est/Haut

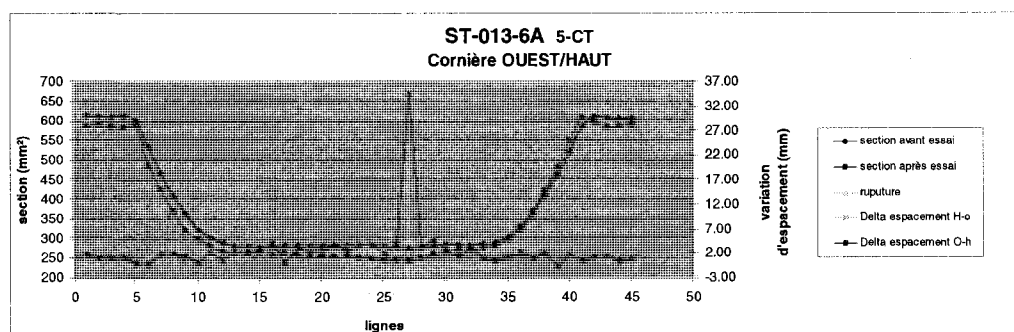


Figure 5-43 : Mesures sur la cornière à la position Ouest/Haut

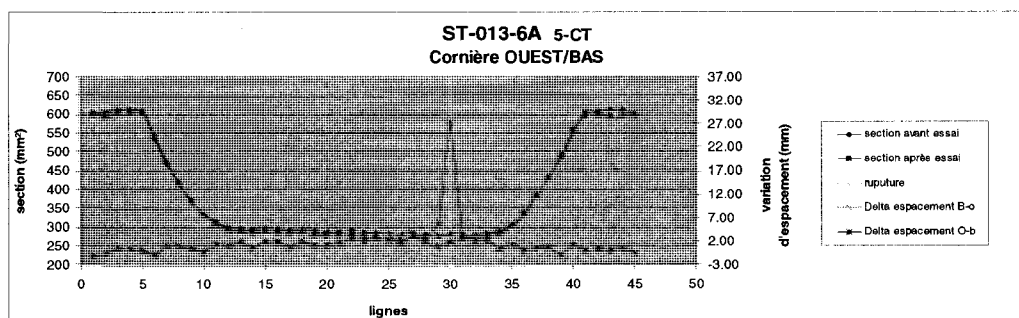


Figure 5-44 : Mesures sur la cornière à la position Est/Bas

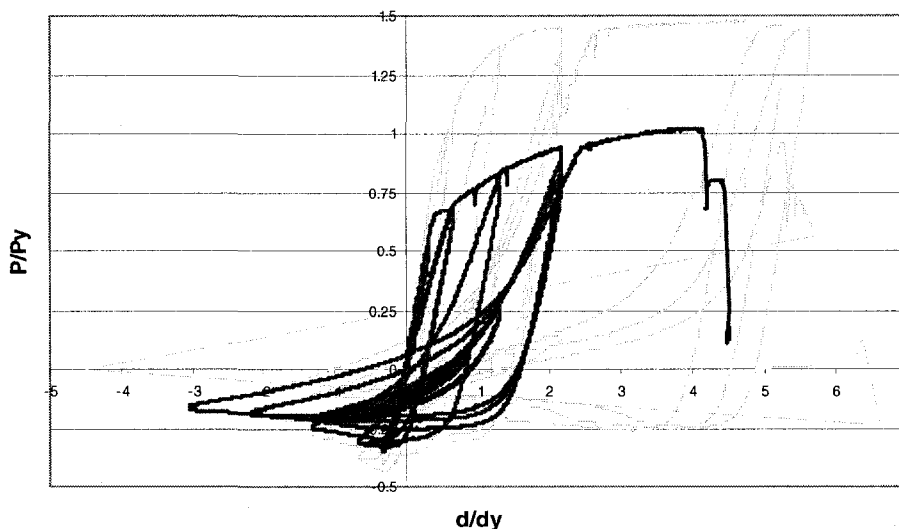
La découpe des cornières a été fait au chalumeau, comme pour le premier programme expérimental. Nous pouvons remarquer que la rupture se produit au droit de la ligne ayant le défaut de rectitude le plus pénalisant. Autrement dit, à la ligne ayant l'aire la plus réduite.

Nous avons, avant l'essai, tracé des lignes à tous les 20mm. Une fois l'essai terminé, nous avons remesuré la distance entre les lignes afin de vérifier si l'élongation est constante sur toute la longueur, ce qui confirmerait une plastification constante. La Figure 5-41, la Figure 5-42, la Figure 5-43 et la Figure 5-44 montrent que l'élongation est relativement constante sur toute la longueur de la section réduite des spécimens ce qui se traduit par une distribution uniforme des déformations plastiques. Étant donné que la rupture ne se produit pas dans la zone de transition et que l'élongation est constante sur toute la longueur de la section réduite des cornières, nous pouvons dire que le comportement des fusibles est adéquat, suivant les objectifs que nous nous sommes fixés.

En ayant un comportement cyclique adéquat, et une charge en traction réduite, nous pouvons déjà observer que cette diagonale respecte les conditions d'admissibilité. Voyons si cette configuration est aussi fiable lors d'un essai sans perturbation, pour un chargement cyclique débutant en compression et un essai dynamique.

Deuxième essai cyclique débutant en traction

La Figure 5-45 présente les résultats de la charge en fonction du déplacement pour la deuxième diagonale soumise à un chargement cyclique débutant en traction. De cette manière, nous pourrions éliminer les probabilités d'avoir faussé les résultats obtenus du premier essai en ayant interrompu son déroulement.

1CT vs. 5CT_2- P/P_y en fonction de d/d_y Figure 5-45 : 5CT_2 – P/P_y en fonction de δ/δ_y

En comparant le graphique de ce spécimen à celui du spécimen précédent, nous pouvons confirmer une similitude dans les résultats, ce qui nous laisse croire que notre intervention dans la manipulation de la diagonale n'a pas altéré les résultats d'essai en ce qui a trait à la résistance du spécimen. Ainsi, les résistances en compression et en traction sont similaires pour les deux essais. Cependant, nous remarquons que le ratio de déplacement est différent, ce qui peut indiquer que nous avons pu fausser les résultats quant au déplacement. Néanmoins, ne voulant pas nous attarder sur les raisons qui pourraient expliquer l'élongation excédentaire, nous pensons que nous devrions considérer le graphique du spécimen décrit dans cette section puisque le déroulement de l'essai est identique à celui des essais subséquents.

En comparant la courbe de l'essai à la courbe du spécimen témoin (ligne pâle), que la résistance en traction est réduite de $1.48P_y$ pour le spécimen témoin à $1.02P_y$ pour le

spécimen. La résistance en compression est aussi réduite de $0.43P_y$ pour le spécimen témoin à $0.35P_y$ pour le spécimen. Pour sa part, l'élongation est de l'ordre de $4.0\delta_y$ alors qu'elle était de $5.64\delta_y$ pour le spécimen témoin.

La rupture a eu lieu, tel que prévu, dans le fusible, lorsque ce dernier était en traction. Le profilé tubulaire a flambé tel que prévu, mais n'a pas subi de rupture. Les rapports (b/t) étant respectés pour ce spécimen, il n'y a pas eu de déchirement du profilé tubulaire dû au voilement local.

Tout comme pour l'essai précédent, nous avons procédé aux mesures des ailes et de l'élongation avant et après l'essai. Nous avons placé ces graphiques à l'annexe B. Cependant, nous remarquons que la rupture s'est produite au droit de l'aire la plus réduite, que l'élongation est constante sur toute la longueur de la section réduite et que la rupture s'est produite dans les cornières à l'extérieur de la zone de transition.

Essai Cyclique débutant en compression

Le prochain spécimen a la même géométrie que les deux essais précédents. Cependant, les spécimens précédents ont subi un protocole de chargement qui augmente l'amplitude du signal lorsque les diagonales sont soumises à une charge de traction (protocole de chargement CT). Dans le cas du présent spécimen, nous proposons d'utiliser le même protocole de chargement CC, ce qui signifie que les amplitudes de déplacement sont les mêmes, mais que le protocole est modifié de manière à ce que les augmentations de l'amplitude du signal se produisent lorsque la diagonale subit une compression.

La Figure 5-46 présente la charge en fonction du déplacement pour ce spécimen.

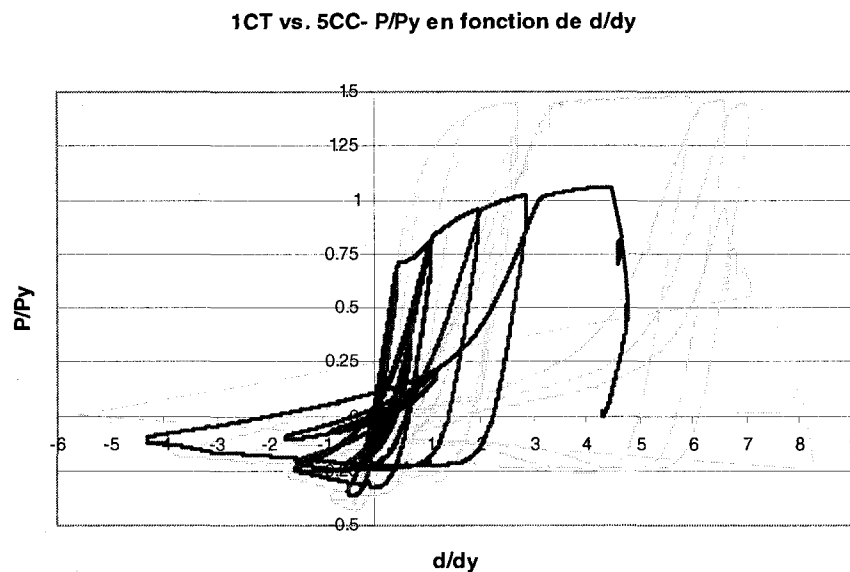


Figure 5-46 : 5CC – P/P_y en fonction de δ/δ_y

En comparant la courbe de l'essai à la courbe du spécimen témoin (ligne pâle), que la résistance en traction est réduite de $1.48P_y$ pour le spécimen témoin à $1.06P_y$ pour le spécimen. La résistance en compression est aussi réduite de $0.43P_y$ pour le spécimen témoin à $0.36P_y$ pour ce spécimen. L'élongation de ce spécimen est de $4.4\delta_y$ alors qu'elle était de $5.64\delta_y$ pour le spécimen témoin.

La rupture a eu lieu, tel que prévu, dans le fusible, lorsque ce dernier était en traction. Le profilé tubulaire a flambé tel que prévu, mais n'a pas subi de rupture. Les rapports (b/t) étant respectés pour ce spécimen, il n'y a pas eu de déchirement du profilé tubulaire dû au voilement local.

À partir de ces résultats, nous pouvons prétendre que le comportement de la diagonale ayant des fusibles est indépendant de la direction du séisme. Le comportement est similaire peu importe que l'amplification du signal se traduit par une charge de compression ou de traction.

Nous avons, tout comme pour les autres spécimens, mesuré la paroi des ailes de cornière et l'élongation avant et après l'essai. Les résultats sont montrés sur les graphiques mis en annexe. Nous pouvons néanmoins indiquer que la rupture s'est produite à l'extérieur de la zone de transition, au droit de la section la plus réduite et que l'élongation des cornières a été constante sur toute la longueur réduite.

La Figure 5-47 montre le flambement de la diagonale. Comme nous pouvons le remarquer et comme nous l'avons prévu, le flambement se produit dans le profilé tubulaire, et le fusible ne flambe pas.

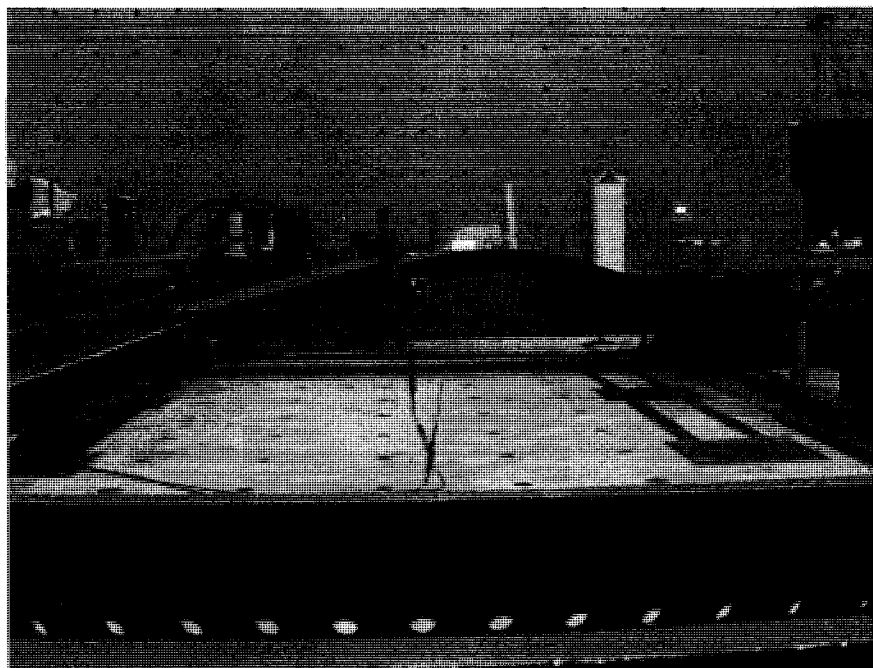


Figure 5-47 : Flambement du spécimen 5CC sous une charge de compression

Essai dynamique

L'essai dynamique est un essai rapide qui a pour objectif de visualiser le comportement de la diagonale lorsque soumis à un protocole de chargement qui ressemble à un séisme. Dans ce type de chargement, l'inversion de la charge de compression en charge de traction est très rapide. Comme le montre la Figure 5-48, le tracé des essais dynamiques n'est pas aussi lisse que ceux des essais cycliques.

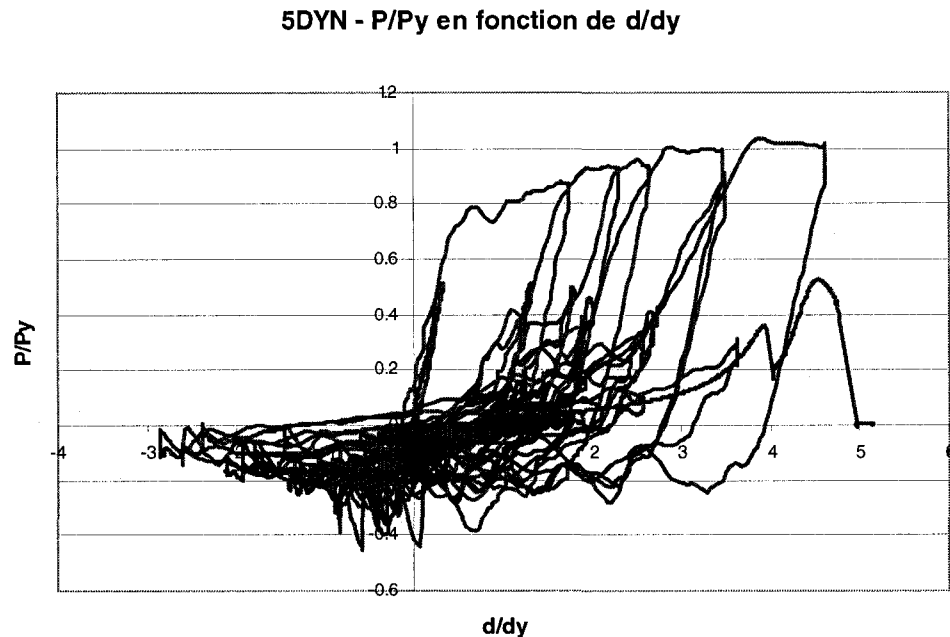


Figure 5-48 : 5DYN - P/P_y en fonction de δ/δ_y

La résistance en traction est de $1.03P_y$ pour ce spécimen ce qui se rapproche des valeurs des essais suivant un protocole de chargement CT et CC. La résistance en compression a cependant subi une amélioration par rapport aux essais suivant des protocoles CT et CC. Ainsi, elle est de $0.45P_y$ ce qui surpasse la résistance en compression du spécimen témoin à $0.43P_y$. L'élongation de ce spécimen est de $4.56\delta_y$ alors qu'elle était de $5.64\delta_y$ pour le spécimen témoin.

La rupture a eu lieu dans le fusible, lorsque ce dernier était en traction. Le profilé tubulaire a flambé tel que prévu, mais n'a pas subi de rupture. Les rapports (b/t) étant respectés pour ce spécimen, il n'y a pas eu de déchirement du profilé tubulaire dû au

voilement local.

Nous pouvons dire que le comportement adéquat de l'hystérésis montré à la Figure 5-48 en raison qu'elle se rapproche des essais précédents (5CT et 5CC) et celle du spécimen témoin (1CT). La charge de rupture en traction est de 613kN et la charge en compression est de 269kN. Ces charges sont similaires aux charges obtenues des essais cycliques.

Même sous un chargement dynamique, nous remarquons que le comportement des diagonales est similaire aux diagonales sous un chargement cyclique.

5.5.2.7 Quatre cornières suivant la conception 2

Comme nous l'avons expliqué précédemment, nous voulons étudier le comportement des diagonales lorsque nous faisons varier la longueur du fusible. En doublant la longueur des cornières formant le fusible, nous pensons que la résistance demeura la même, mais que les déformations augmenteront d'environ du double.

Les mêmes facteurs de sécurité ont été appliqués que pour les spécimens de la section précédente. Ainsi, les facteurs ϕ , R_{sh} et R_y ont été considérés lors de la conception. En appliquant ces facteurs, la section réduite des cornières limite les possibilités d'économie.

Pour cette géométrie, nous avons procédé à deux essais. Pour le premier spécimen, nous avons suivi un protocole de chargement cyclique pour lequel l'augmentation de l'amplitude soumet la diagonale à une charge de traction (TC). Le deuxième spécimen a aussi été soumis à un protocole de chargement cyclique, mais pour lequel l'augmentation de l'amplitude se fait lorsque la diagonale est soumise à une charge de compression (CC).

Spécimen 6CT – Cyclique traction

La Figure 5-49 présente la charge développée dans la diagonale en fonction de la déformation dans la diagonale. Comme nous le prévoyons, la résistance de cette conception est similaire à celle des spécimens de la section précédente. Ainsi, ce spécimen a résisté à une charge de compression de $0.37P_y$ et a subi la rupture sous une charge de traction de $1.01P_y$.

1CT vs. 6CT- P/P_y en fonction de d/d_y

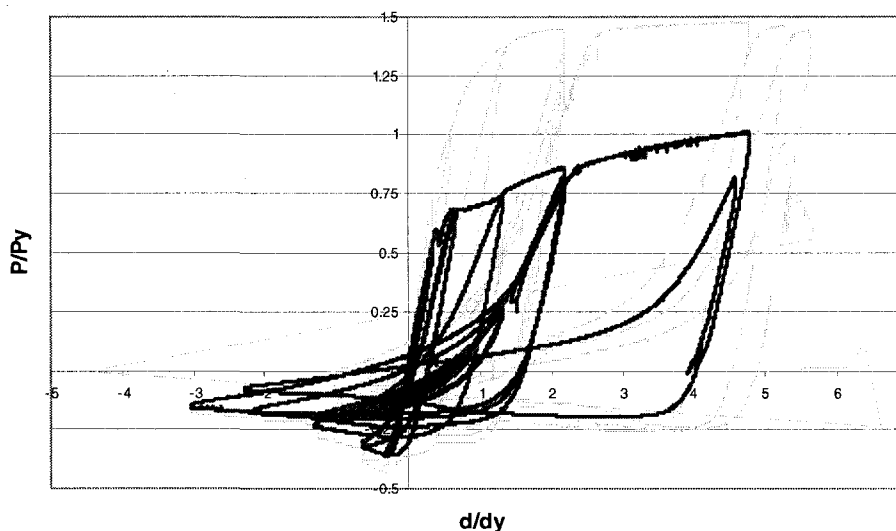


Figure 5-49 : 6CT – P/P_y en fonction de δ/δ_y

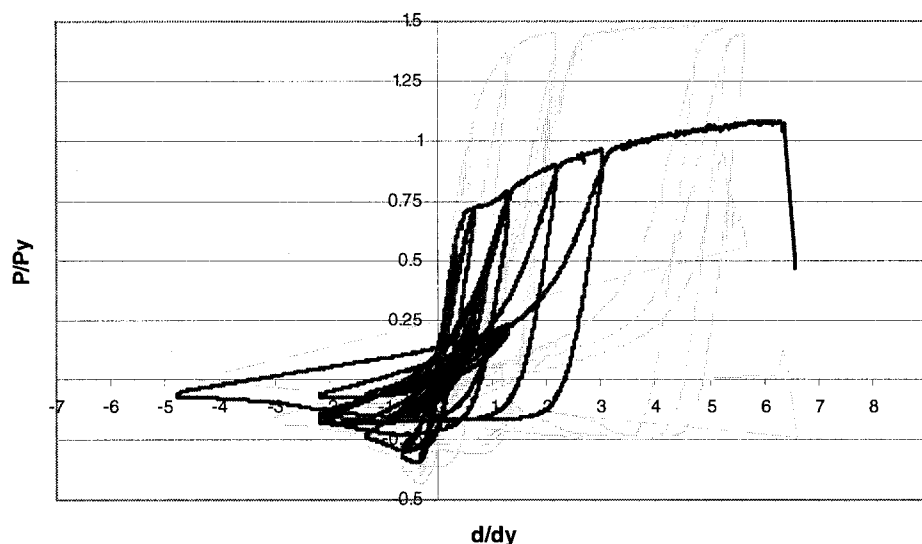
En ayant augmenté la longueur du fusible, nous avons permis aux cornières de subir une plus grande élongation avant leur rupture. Par conséquent, ces spécimens ont pu résister à un plus grand nombre de cycles avant de subir la rupture. Ce spécimen a ainsi enregistré une élongation de $4.77\delta_y$.

Comme pour les autres spécimens, nous avons mesuré les parois et l'élongation des cornières avant et après l'essai. Nous avons placé le résultat de ces mesures en annexe. Cependant, nous pouvons mentionner que l'élongation des cornières est constante sur toute la longueur réduite et que la rupture s'est produite à l'extérieure de la zone de transition, au droit de la section la plus réduite.

La rupture a eu lieu dans le fusible, lorsque ce dernier était en traction. Le profilé tubulaire a flambé tel que prévu, mais n'a pas subi de rupture. Les rapports (b/t) étant respectés pour ce spécimen, il n'y a pas eu de déchirement du profilé tubulaire dû au voilement local.

Spécimen 6CC – Cyclique compression

La Figure 5-50 présente la charge reprise par la diagonale en fonction de la déformation dans la diagonale.

1CT vs. 6CC- P/P_y en fonction de d/d_y Figure 5-50 : 6CC – P/P_y en fonction de δ/δ_y

Cette diagonale a résisté à une charge de compression de 182kN et a subi une rupture sous une charge de traction de 525kN, ce qui est similaire aux charges obtenues des fusibles ayant la même section. Ces valeurs correspondent à une résistance en compression de $0.34P_y$ et en traction de $1.09P_y$.

Comme nous pouvons le remarquer, cette diagonale a subi une déformation de près de 120mm avant de subir la rupture ce qui correspond à $6.37\delta_y$, ce qui dépasse même les résultats du spécimen témoin, $5.64\delta_y$. En effet, cette diagonale a su résister à tout le protocole de chargement sans subir la rupture. Une fois le chargement cyclique terminé, nous étions curieux de savoir à quel point nous pouvions charger la diagonale avant de subir la rupture. Nous avons, par conséquent, procédé à un chargement par

déplacement contrôlé et avons ainsi étiré la diagonale jusqu'à ce qu'elle se rupture.

Ce spécimen a démontré le meilleur comportement sous un chargement cyclique. Son comportement a même permis d'excéder le nombre de cycles repris par le spécimen témoin.

Comme pour les autres spécimens, nous avons mesuré les parois et l'élongation des cornières avant et après l'essai. Nous avons placé le résultat de ces mesures en annexe. Cependant, nous pouvons mentionner que l'élongation des cornières est constante sur toute la longueur réduite et que la rupture s'est produite à l'extérieure de la zone de transition, au droit de la section la plus réduite. La rupture a eu lieu dans le fusible, lorsque ce dernier était en traction. Le profilé tubulaire a flambé tel que prévu, mais n'a pas subi de rupture. Les rapports (b/t) étant respectés pour ce spécimen, il n'y a pas eu de déchirement du profilé tubulaire dû au voilement local.

Néanmoins, malgré qu'il n'y a pas eu de rupture du profilé tubulaire, nous avons tout de même observé du voilement local comme le montre la Figure 5-51 et Figure 5-52.

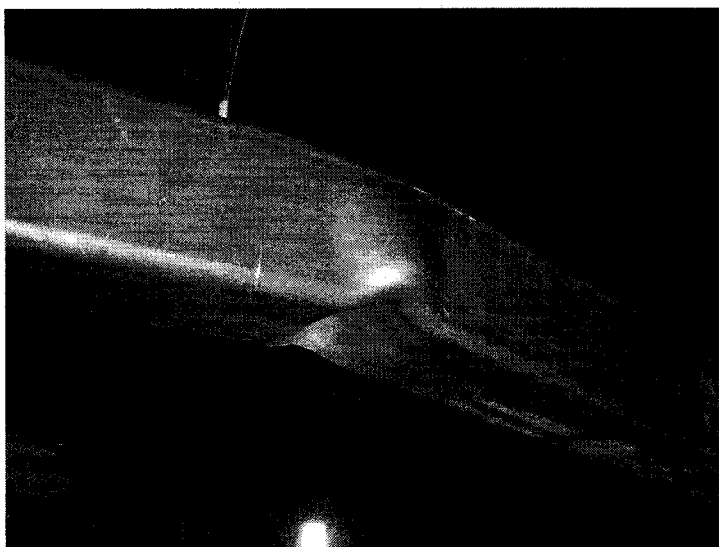


Figure 5-51 : Voilement local à mi-longueur de la diagonale

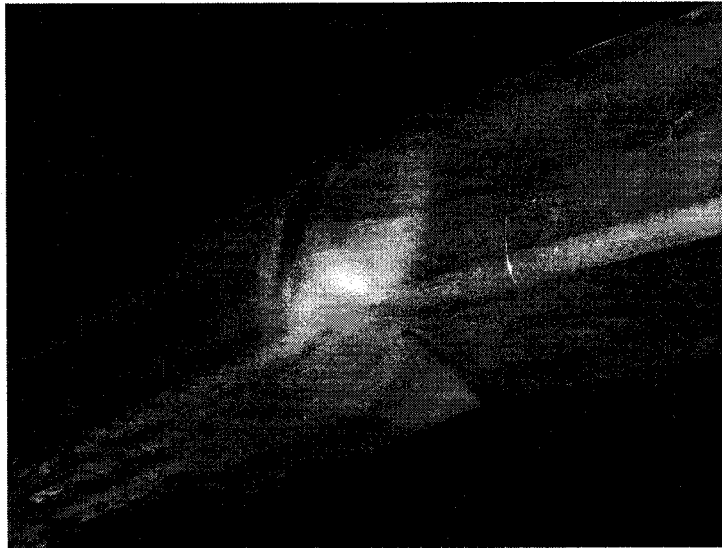


Figure 5-52 : Voilement local à mi-longueur de la diagonale

La Figure 5-53 montre le flambement de la diagonale sous une force de compression.

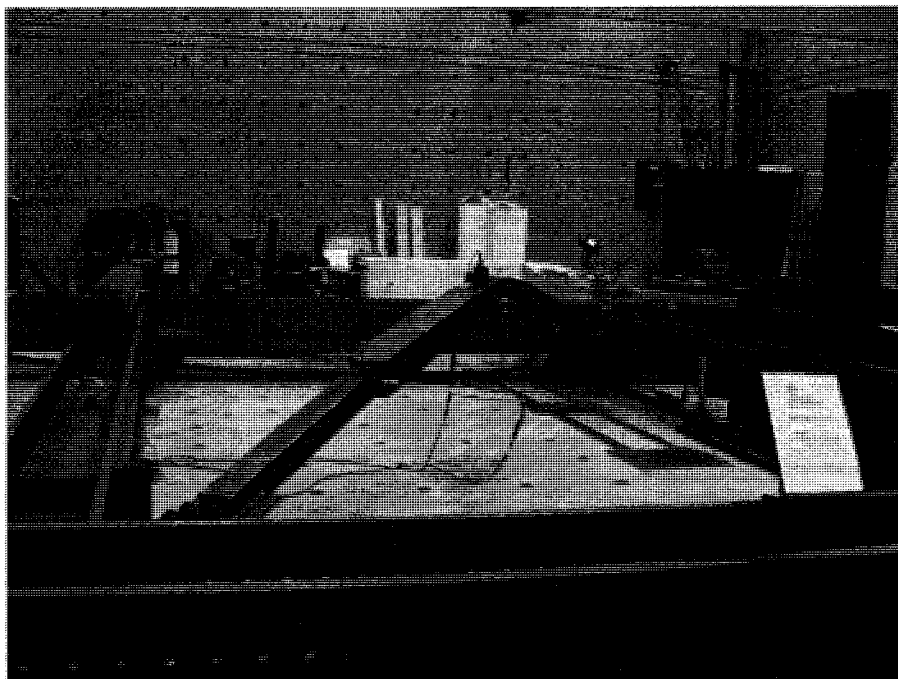


Figure 5-53 : Flambement local de la diagonale

5.5.2.8 Quatre cornières suivant la conception 3

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus pour les spécimens conçus sans facteurs de sécurité.

Les fusibles sont le maillon faible de la structure. Nous contrôlons la séquence de rupture en s'assurant que les fusibles soient les premières composantes structurales sacrifiées. Les autres composantes structurales sont ensuite conçues en appliquant des facteurs de sécurité à la résistance développée par le fusible. Suivant cette séquence, certains peuvent questionner la pertinence d'appliquer des facteurs de sécurité aux fusibles puisque les composantes structurales adjacentes seront conçues à partir de la résistance de ces pièces. Ainsi, une différence significative entre la charge de sollicitation (charge sismique) et la charge de conception (résistance des fusibles) pourrait inutilement surdimensionner les autres composantes structurales.

En ayant négligé tous les facteurs de sécurité, l'aire des fusibles de cette section en est réduit à son minimum, et ainsi, permet d'accroître le potentiel d'économie à son maximum.

Nous avons entrepris deux essais suivant cette philosophie et cette géométrie. Le premier essai a été fait suivant le protocole de chargement cyclique amplifiant l'amplitude du déplacement lorsque la diagonale est soumise à une charge de traction (CT). Le second essai amplifie l'amplitude du chargement cyclique lorsque la diagonale est soumise à une charge de compression (CC).

Essai 7CT – Cyclique traction

Puisque l'aire de la section est réduite, nous pouvons nous attendre à une réduction de la résistance, ce qui pourrait se traduire par un potentiel d'économie plus élevé. La Figure 5-54 présente la charge reprise par la diagonale en fonction du déplacement de la diagonale.

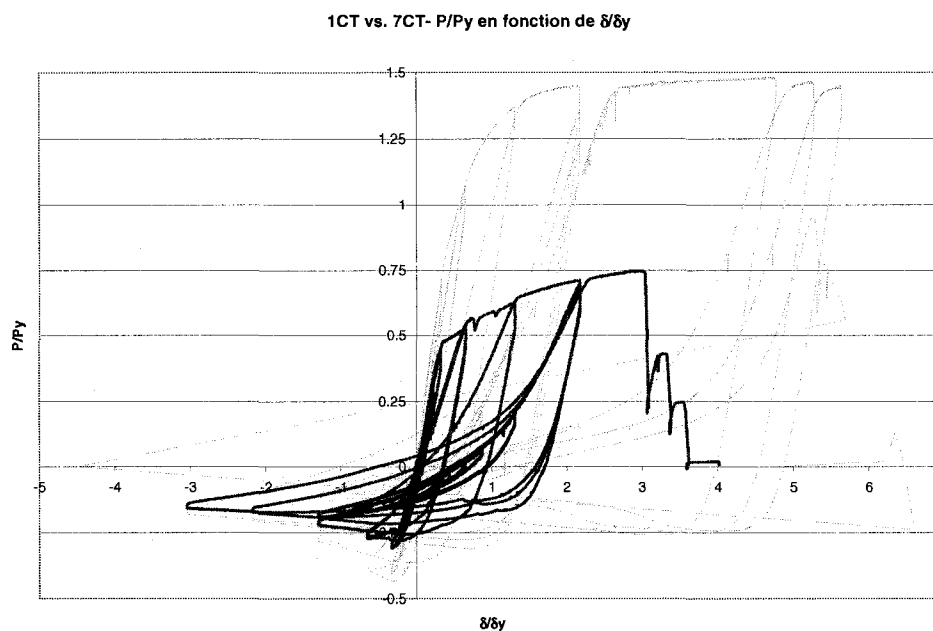


Figure 5-54 : 7CT – P/P_y en fonction de δ/δ_y

Nous pouvons remarquer que la charge de traction est nettement réduite ($0.75P_y$) par rapport au spécimen témoin ($1.48P_y$), ce qui est prometteur en ce qui concerne le potentiel d'économie. Par contre, nous remarquons que la résistance en compression ($0.31P_y$) est inférieure par rapport au spécimen témoin ($0.43P_y$).

Comme pour les autres spécimens, nous avons mesuré les parois et l'élongation des cornières avant et après l'essai. Nous avons placé le résultat de ces mesures en

annexe. Cependant, nous pouvons mentionner que l'élongation des cornières est constante sur toute la longueur réduite et que la rupture s'est produite à l'extérieur de la zone de transition, au droit de la section la plus réduite. La rupture a eu lieu dans le fusible, lorsque ce dernier était en traction. Le profilé tubulaire a flambé tel que prévu, mais n'a pas subi de rupture. Les rapports (b/t) étant respectés pour ce spécimen, il n'y a pas eu de déchirement du profilé tubulaire dû au voilement local.

Essai 7CC – Cyclique compression

La Figure 5-55 présente la charge développée par le vérin en fonction du déplacement dans la diagonale.

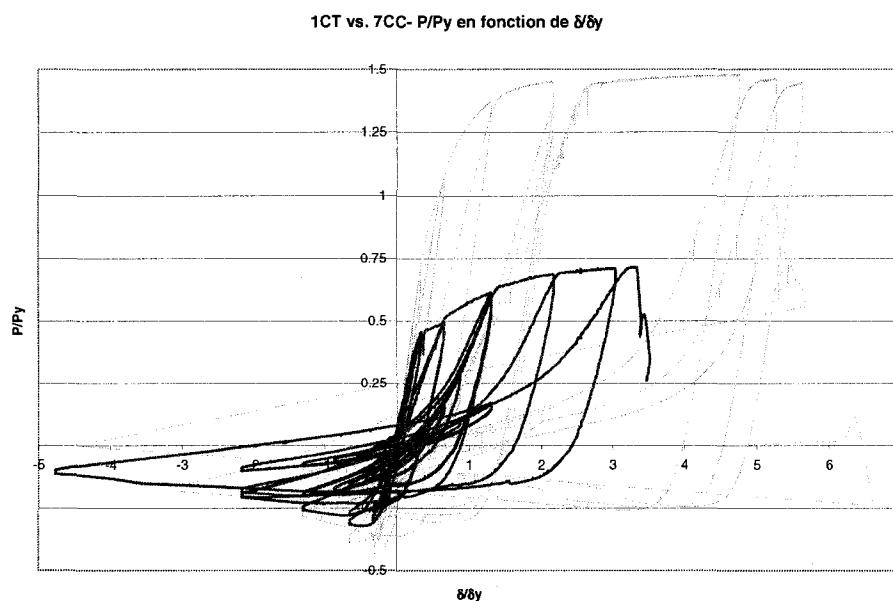


Figure 5-55 : 7CC – P/P_y en fonction de δ/δ_y

Le tracé de la Figure 5-55 est similaire au spécimen 7CT, ce qui indique que le comportement de la diagonale est similaire peu importe que l'amplification de l'amplitude du déplacement survienne lorsque la diagonale est chargée en traction ou

en compression. Ce spécimen a résisté à une charge en compression de $0.32P_y$ et a subi la rupture sous une charge de traction de $0.72P_y$.

En ayant réduit la largeur des ailes, nous avons aussi réduit l'élongation avant la rupture du spécimen. Ce spécimen a ainsi résisté à une élongation de $3.40\delta_y$.

Comme pour les autres spécimens, nous avons mesuré les parois et l'élongation des cornières avant et après l'essai. Nous avons placé le résultat de ces mesures en annexe. Cependant, nous pouvons mentionner que l'élongation des cornières est constante sur toute la longueur réduite et que la rupture s'est produite à l'extérieure de la zone de transition, au droit de la section la plus réduite.

5.5.2.9 Quatre cornière sur autre profilé tubulaire – conception 1

Pour terminer le deuxième programme expérimental, nous avons voulu élargir notre étude en procédant à un essai sur un spécimen formé d'un autre profilé tubulaire. Comme nous l'expliquions précédemment, ce spécimen a pour objectifs de permettre d'élargir nos conclusions en généralisant l'adoption des fusibles, mais surtout d'amorcer la possibilité de se soustraire aux restrictions quant au rapport b/t.

La Figure 5-56 présente la charge reprise par la diagonale en fonction du déplacement dans la diagonale.

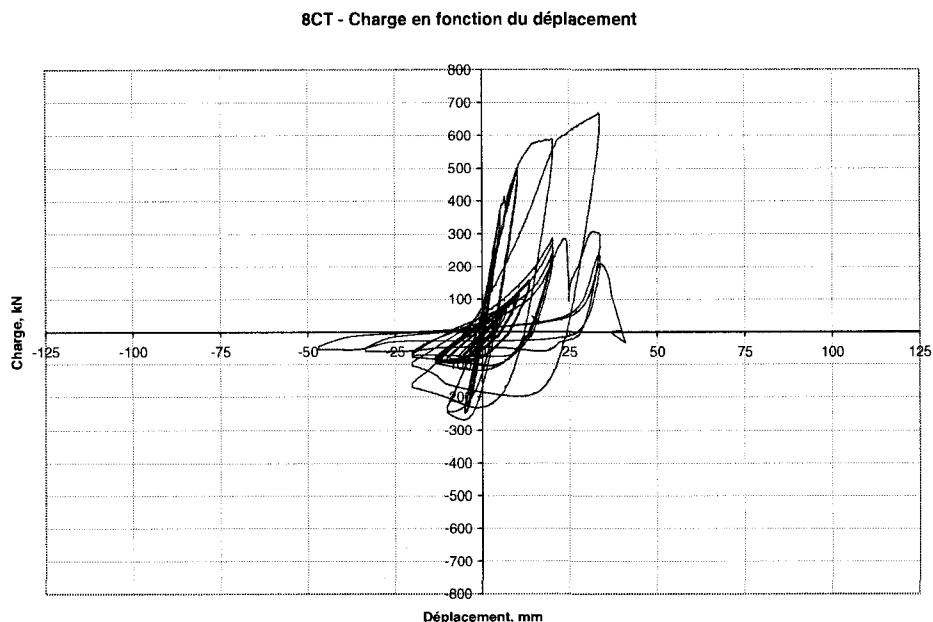


Figure 5-56 : 8CT – P/P_y en fonction de δ/δ_y

Contrairement à nos attentes, la rupture du spécimen s'est produite dans le profilé tubulaire, plutôt que dans le fusible. Sous une charge compressive, nous avons remarqué que le profilé tubulaire subissait le voilement local. Suivant la charge compressive, la rupture du spécimen s'est produite par déchirement du profilé tubulaire sous une charge de compression. Suivant les résultats obtenus pour cet essai, nous pensons que les restrictions quant au rapport b/t doivent être respectés, même avec l'ajout d'un fusible.

Néanmoins, avant que la rupture ne se produise, nous remarquons que ce spécimen a su résister à plusieurs cycles. Le profilé tubulaire étant plus gros, sa résistance en compression est aussi plus grande ($0.32P_y$). Par conséquent, le fusible doit aussi être plus grand de manière à ce que sa résistance en compression soit au moins équivalente à celle du profilé tubulaire. La résistance en traction du profilé tubulaire étant aussi plus

grande, nous remarquons qu'il y a toujours un potentiel d'économie intéressant. Bien que nous n'ayons pas de profilé témoin pour comparer le potentiel d'économie à une valeur expérimentale, nous pouvons tout de même la comparer à une valeur théorique. La résistance à la rupture en traction du profilé tubulaire HSS127x127x4.8 tel que calculé suivant les indications de la norme S16 est de 1266kN alors que ce spécimen pour lequel un fusible a été ajouté, a subi la rupture en traction à une force de 670kN.

Les Figure 5-57 à Figure 5-61 montrent le voilement local du profilé tubulaire, jusqu'au déchirement et à sa rupture. Ceci confirme bien que les rapports b/t doivent être respectés, même avec l'ajout d'un fusible.

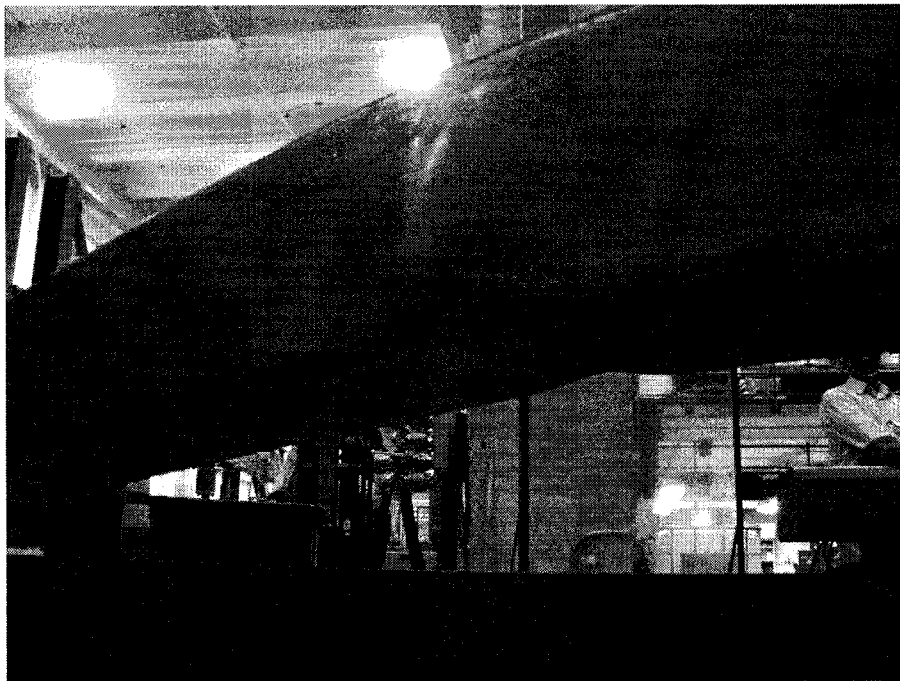


Figure 5-57 : Flambement local du spécimen 8CT à mi-longueur de la diagonale



Figure 5-58 : Début du déchirement des parois

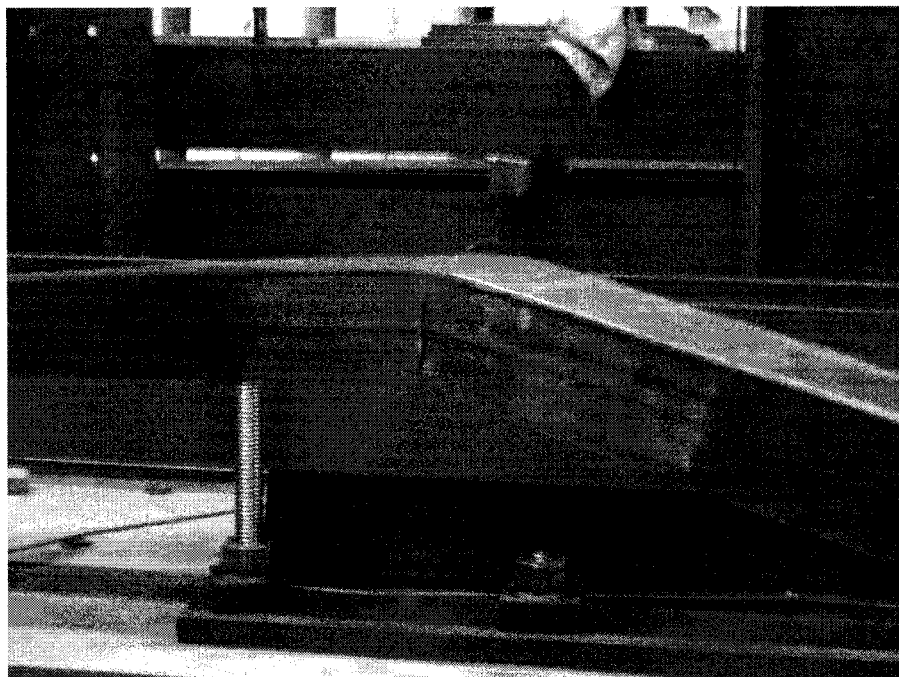


Figure 5-59 : Flambement de la diagonale

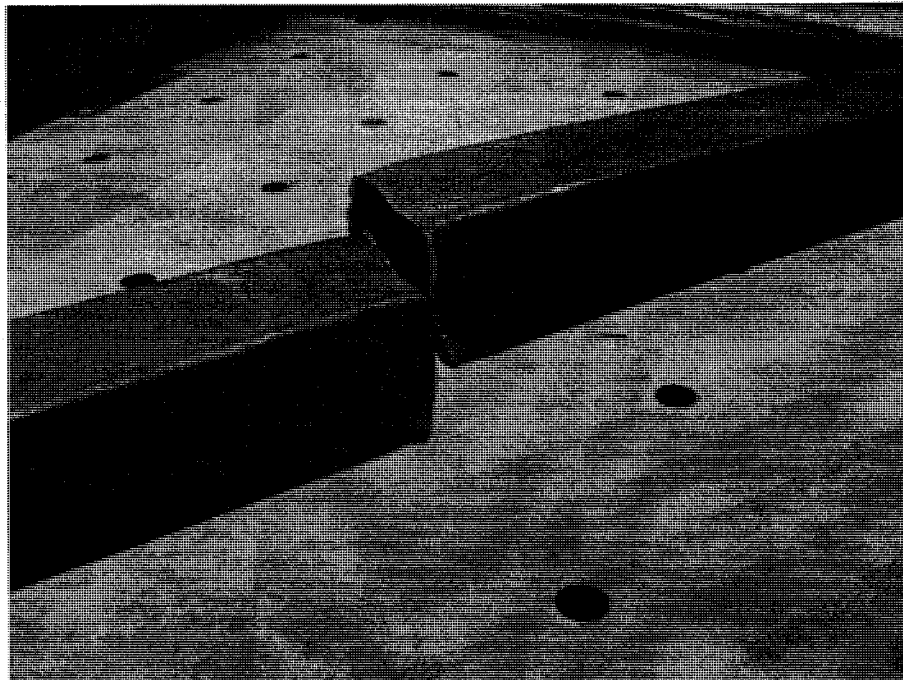


Figure 5-60 : Rupture du spécimen 8CT à mi-portée

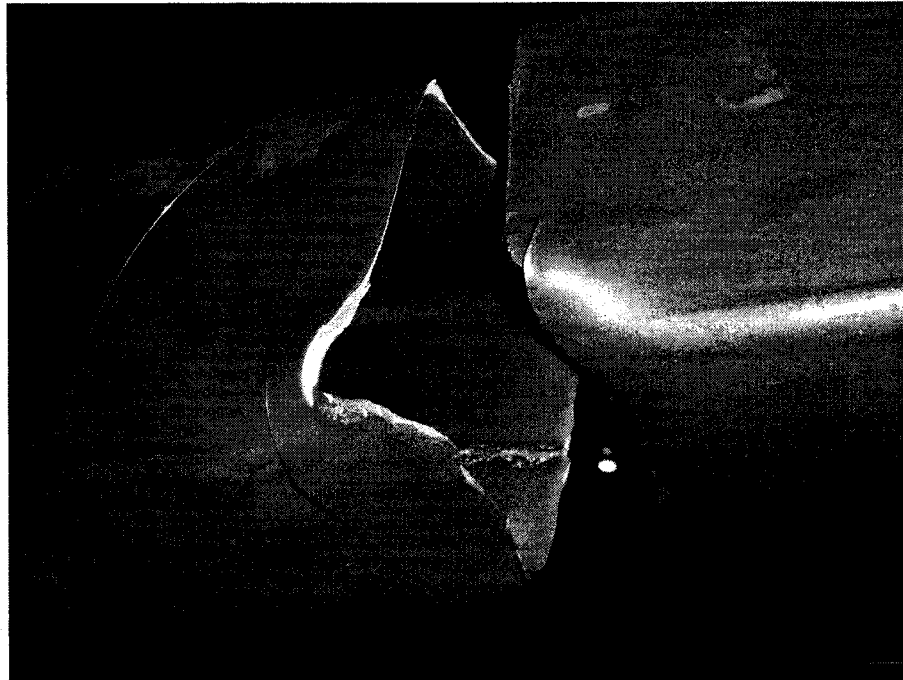


Figure 5-61 : Rupture du spécimen 8CT. Agrandissement de la zone de rupture

5.6 Synthèses des résultats

Nous avons présenté dans les sections précédentes les résultats obtenus individuellement pour chacun des spécimens. Cependant, afin de pouvoir comparer les résultats entre les différents spécimens, et ainsi pouvoir généraliser les conclusions, nous présenterons à cette section, une synthèse des résultats qui combineront tous les résultats obtenus.

Le Tableau 5-2 résume les essais que nous avons réalisés en indiquant la codification à laquelle nous référerons dans les prochains graphiques et tableaux.

Essai No.	Description
1CT	Aucun fusible – Protocole de chargement cyclique en tension
2CT	3 trous circulaires sur chaque face – Protocole de chargement cyclique en tension
2DYN	3 trous circulaires sur chaque face – Protocole de chargement dynamique
3CT	Trou circulaire sur chaque face – Protocole de chargement cyclique en tension
4CT	Trou ovalisé sur chaque face – Protocole de chargement cyclique en tension
4DYN	Trou ovalisé sur chaque face – Protocole de chargement dynamique
5CC	Conception 1 – Protocole de chargement cyclique en compression
5CT	Conception 1 – Protocole de chargement cyclique en tension
5CT_2	Conception 1 – Protocole de chargement cyclique en tension
5DYN	Conception 1 – Protocole de chargement cyclique dynamique
6CC	Conception 2 – Protocole de chargement cyclique en compression
6CT	Conception 2 – Protocole de chargement cyclique en tension
7CC	Conception 3 – Protocole de chargement cyclique en compression
7CT	Conception 3 – Protocole de chargement cyclique en tension
8CT	Conception 1 – Protocole de chargement cyclique en tension

Tableau 5-2 : Résumé et numérotation des essais

Le Tableau 5-3 présente les valeurs numériques indiquant la charge maximale atteinte en compression et la charge de rupture en traction pour chacun des spécimens. De plus, nous comparons à ce tableau, la variation de charges en compression et en traction par rapport au spécimen de référence (1CT).

Essai No.	Spécimen		Référence (1CT)		Valeurs calculée		Réduction	
	Tu	Cu	Tu	Cu	Tu	Cu	Tu	Cu
	kN	kN	kN	kN			%	%
1CT	870	256	870	256	806	259	0%	0%
2CT	278	124	870	256	325	259	68%	52%
2DYN	294	213	870	256	325	259	66%	17%
3CT	267	189	870	256	325	259	69%	26%
4CT	279	121	870	256	325	259	68%	53%
4DYN	307	137	870	256	325	259	65%	47%
5CC	625	209	870	256	616	259	28%	18%
5CT_1	636	350	870	256	616	259	27%	-37%
5CT_2	621	206	870	256	616	259	29%	19%
5DYN	613	269	870	256	616	259	30%	-5%
6CC	619	215	870	256	616	259	29%	16%
6CT	598	217	870	256	616	259	31%	15%
7CC	438	199	870	256	328	259	50%	22%
7CT	439	183	870	256	328	259	50%	29%
8CT	790	318	-	-	1142	479	-	-

Tableau 5-3 : Synthèse des valeurs expérimentales

Pour les spécimens ayant pour fusibles des ouvertures, la réduction quant à la charge de traction est optimale présentant une réduction moyenne de 67%. Cependant, nous remarquons aussi que la résistance en compression de ces spécimens a drastiquement

chutée en comparaison au spécimen de référence. De plus, il est à se rappeler que leurs comportements sous un chargement cyclique n'est pas adéquat.

Les spécimens conçus suivant un fusible formé de quatre cornières suivant la conception 1, permettent une économie moyenne de 30% à la charge de traction de référence et une réduction de 19% de la charge en compression par rapport spécimen de référence. Les spécimens conçus suivant la conception 3 ont su générer plus d'économie quant à leur charge en traction en présentant une réduction moyenne de 50%. Cependant, la résistance en compression de ces spécimens a subi une réduction moyenne de 25%.

Nous avons aux sections précédentes, présenté les graphiques de la charge en fonction de la déformation. En observant les graphiques des spécimens, nous pouvions déterminer lesquels résistaient adéquatement à des chargements cycliques, sans toutefois pouvoir identifier à quel cyclique ils subissaient la rupture. La Figure 5-62 présente la position de rupture pour les spécimens soumis au protocole de chargement amplifiant l'amplitude du signal lorsque la diagonale était soumise à une charge de traction (CT).

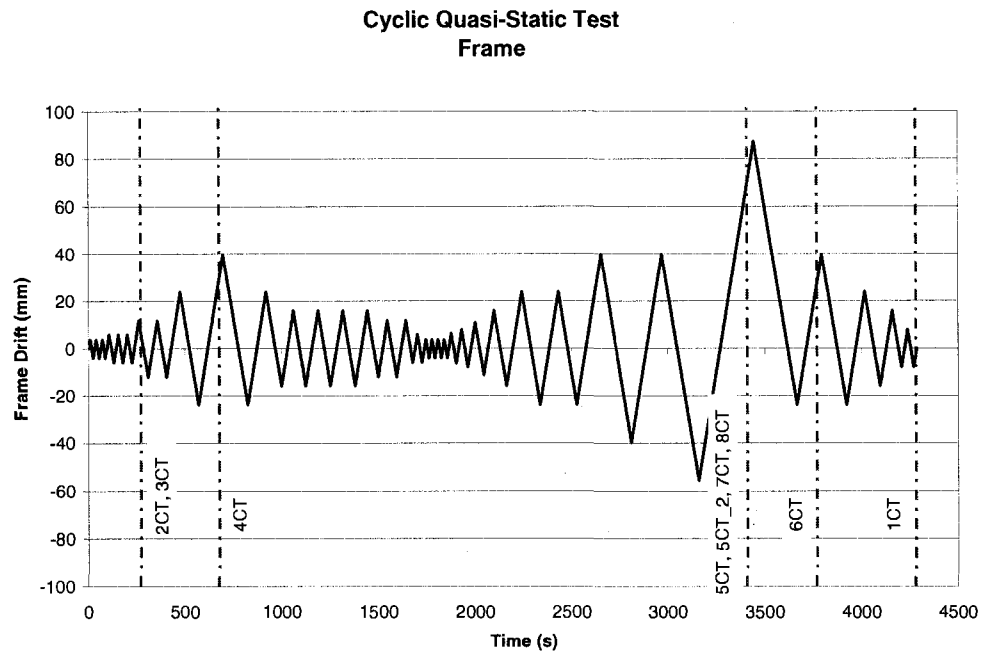


Figure 5-62 : Point de rupture des spécimens soumis au protocole de chargement CT

De la même manière, la Figure 5-63 présente les cycles auxquels les spécimens ont subi la rupture sous le protocole de chargement amplifiant l'amplitude du signal lorsque les diagonales sont soumises à une charge de compression (CC).

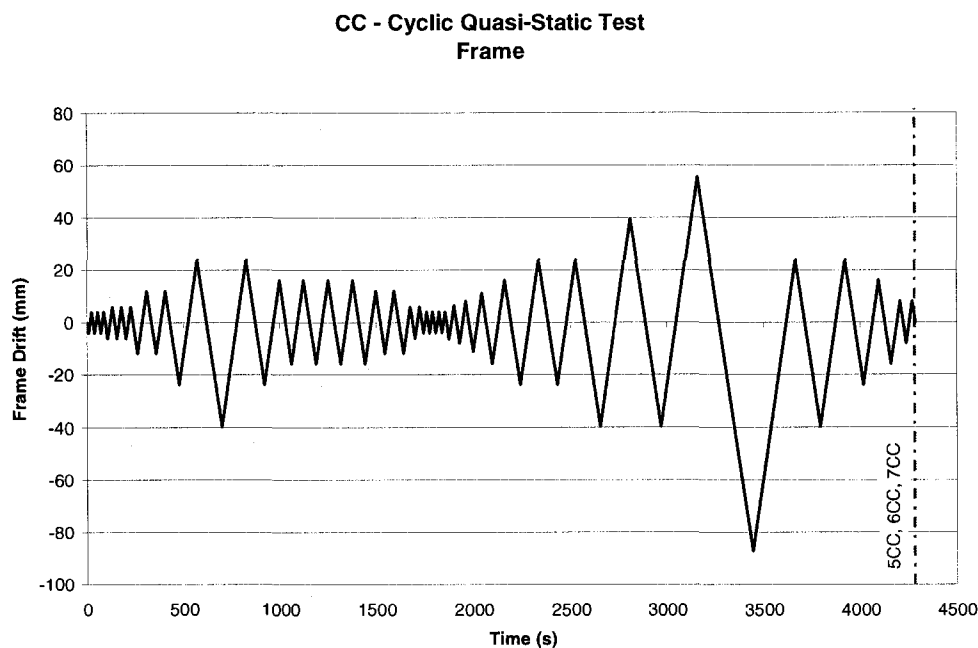


Figure 5-63 : Point de rupture des spécimens soumis au protocole de chargement CC

En observant les figures précédentes, nous remarquons que les spécimens soumis au protocole de chargement CC ont pu résister à plus de cycles que leurs semblables subissant le protocole de chargement CT. Cette situation peut s'expliquer en raison de l'espacement qui se crée à la jonction des deux profilés tubulaires. Ainsi, lorsque nous augmentons l'amplitude du signal lorsque la diagonale est en traction, l'espacement entre les profilés tubulaires est augmenté, et lorsqu'il s'agit de déplacement plastique, les profilés tubulaires ne sont plus en contact au prochain cycle en compression. Par contre, lorsque l'amplification du signal se fait en compression, nous permettons à la diagonale de résister à un cycle supplémentaire, puisque l'espacement entre les profilés tubulaires se fait un cycle plus tard.

Finalement, nous avons voulu comparer l'élancement hors plan de tous les profilés. La Figure 5-64 présente le déplacement hors plan enregistré au centre de la diagonale par

le potentiomètre à corde en fonction de la charge développée par le vérin et ce, pour les spécimens ayant pour fusible l'agencement de quatre cornières et soumis au protocole de chargement amplifiant le signal lorsque la diagonale est en traction.

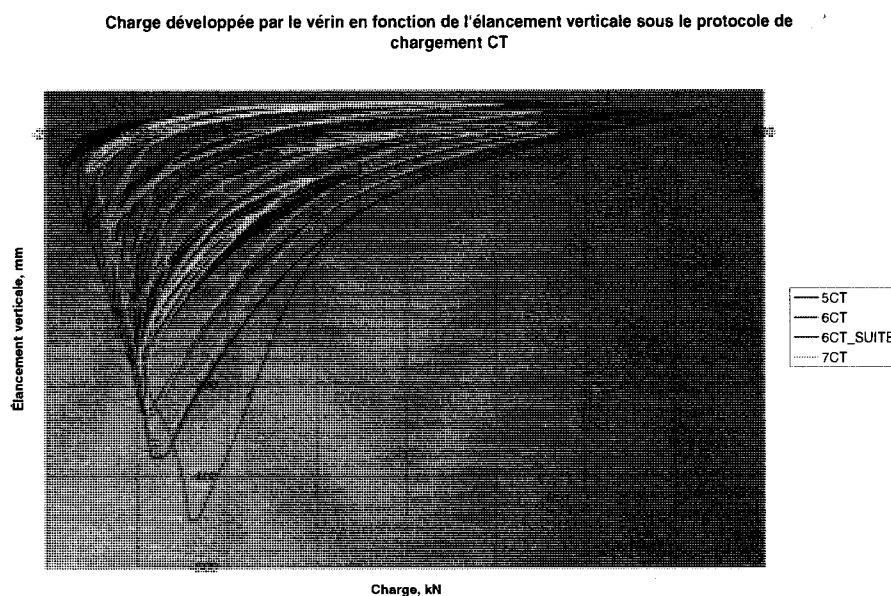


Figure 5-64 : Déplacement vertical en fonction de la charge pour protocole CT

De la même manière, la Figure 5-65 présente l'élançement vertical enregistré par le potentiomètre à corde en fonction de la charge développée dans le vérin et ce, pour les spécimens ayant pour fusible l'agencement de quatre cornières et soumis au protocole de chargement amplifiant le signal lorsque la diagonale est en compression.

Charge développée par le vérin en fonction de l'élanement verticale sous le protocole de chargement CC

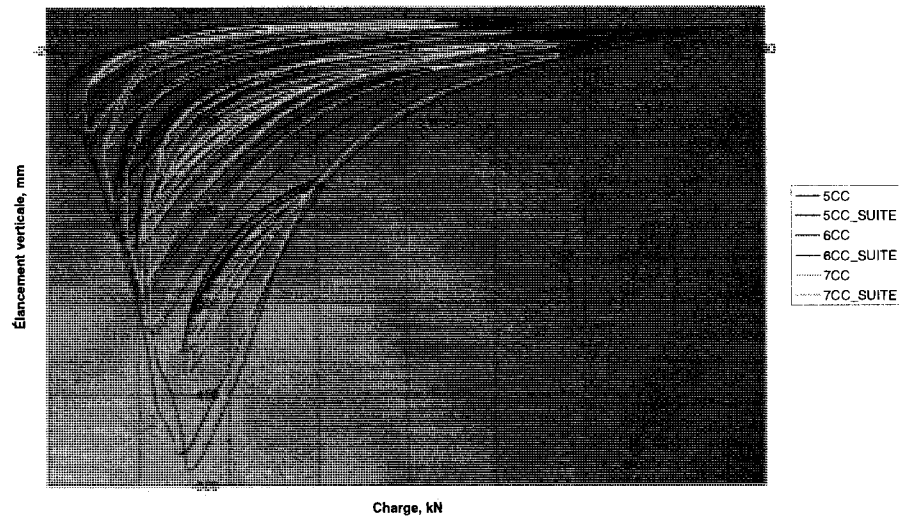


Figure 5-65 : Déplacement vertical en fonction de la charge pour protocole CC

Nous pouvons remarquer qu'indépendamment de la l'aire du fusible, de sa longueur et du protocole de chargement suivi, les spécimens ont tous exhibé un élanement hors plan constant. En ce sens, pour une même charge développée dans le vérin, tous les spécimens ont subi la même flèche verticale.

5.7 Discussions

Dans ce programme expérimental, nous avons procédé à l'essai de quinze (15) spécimens.

Pour le premier spécimen, nous avons procédé à l'essai d'une diagonale sans fusible, afin de recueillir des informations à partir desquelles nous pourrions juger de la bonne performance des spécimens ayant des fusibles.

Nous avons ensuite procédé à des essais sur des spécimens pour lesquels des ouvertures ont été pratiquées afin de réduire la résistance en traction de la diagonale. Ces ouvertures agissent en guise de fusible. Les résultats sur ces fusibles semblent à première vue favorable puisque la charge en traction est réellement réduite, et ainsi, les composantes structurales adjacentes pourraient bénéficier de cette réduction. Cependant, la résistance en compression de ces diagonales en est aussi nettement réduite. De plus, nous remarquons que ces spécimens ne sont pas résistants sous une charge cyclique. Comme en témoignent les figures précédentes, ces spécimens subissaient la rupture après les premiers cycles de chargement, en raison d'une concentration de contraintes au droit des ouvertures. En effet, la rupture se produisait, dans tous les cas, au droit des ouvertures. À la lumière de ces résultats, nous pensons que ces configurations ne devraient pas être utilisées dans la pratique.

Bien qu'ils n'étaient pas le sujet principale de cette recherche, les spécimens employant des ouvertures à titre de fusibles ont permis de montrer le comportement des spécimens qui sont actuellement utilisés dans certaines conceptions dans la pratique. Les spécimens qui sont le sujet principal de cette recherche sont les spécimens ayant pour fusible, l'agencement de quatre cornières. Nous avons présenté trois (3) conceptions pour lesquels nous les avons soumis à trois protocoles de chargement. Pour ces trois conceptions, nous avons noté que le comportement de ces spécimens était adéquat. Ainsi, ces spécimens ont su réduire les résistances en traction permettant de profiter

d'une réduction quant au calibre des composantes structurales adjacentes. De plus, ces spécimens ont su exhiber une bonne résistance à un chargement cyclique. Finalement, pour les trois conceptions, nous remarquons que les spécimens ont su résister à la majorité des cycles proposés. Les spécimens soumis au protocole CC ont cependant résisté à plus de cycles de chargement que leur jumeau soumis au chargement CT. Puisque la détérioration des fusibles se produit lorsque ces dernières sont en traction, une amplification de l'amplitude du signal lorsque la diagonale est soumise à la compression (protocole CC) assure une meilleure longévité à ces spécimens. Néanmoins, puisque les charges sismiques sont aléatoires, notamment quant à leur direction, les diagonales devront être conçues pour résister au scénario le plus défavorable (CT).

Suivant l'hypothèse que l'ajout d'un fusible reprenant la charge de traction nous permettrait possiblement de nous soustraire au rapport b/t , nous avons aussi dans ce programme d'essais proposé d'élargir notre étude en procédant à l'essai d'un profilé (HSS127) pour lequel, les rapports b/t ne sont pas respectés. Les premières observations indiquent que la résistance en traction est réduite tel que prévue. De plus, ce spécimen a montré une bonne résistance au chargement cyclique. Cependant, la rupture du spécimen s'est produite dans le profilé tubulaire, par déchirement à la suite de l'observation du voilement local. Par conséquent, nous pensons que les rapports b/t doivent être respectés, même pour les spécimens ayant un fusible.

CHAPITRE 6 – SOMMAIRE ET CONCLUSIONS

Cette étude avait pour objectif de valider l'ajout de fusibles aux diagonales de contreventement. Pour y parvenir, nous avons, dans un premier temps, étudié les codes de référence décrivant les prescriptions à suivre dans le cadre d'une conception sismique. Ainsi, nous avons présenté les directives à suivre du CNBC05 pour la détermination de la charge sismique suivant la méthode statique équivalente. Nous avons aussi présenté les directives à suivre lors de la sélection des profilés suivant la norme d'acier S16-01.

Par la suite, nous avons entrepris la réalisation d'une étude paramétrique qui soumettait plusieurs géométries de bâtiments à une analyse statique équivalente à partir de laquelle, les profilés étaient choisis. À partir de cette étude paramétrique, nous avons pu vérifier que l'ajout de fusibles pouvait s'avérer une alternative économique dans le cas de contreventement travaillant en tension-compression, puisque les charges transmises aux composantes structurales adjacentes étaient réduites par rapport à l'approche de la construction conventionnelle. C'est à partir de ce résultat que nous avons décidé de poursuivre l'étude au niveau expérimental, et par conséquent, nous nous sommes intéressés à connaître les profilés les plus récurrents, et la géométrie de cadre la plus avantageuse, et ce afin de recréer ces situations au laboratoire.

Le premier programme expérimental avait pour objectif d'étudier le comportement individuel du fusible, avant qu'il ne soit implémenté à la diagonale. À cette étape, nous voulions définir une géométrie de fusible qui a la résistance en traction équivalente à la charge de conception, et qui pourra adéquatement assurer un transfert des efforts sans concentration de contraintes, afin qu'un comportement plastique uniforme sur toute la longueur du fusible. En raison de la géométrie particulière du fusible, deux approches s'offraient pour étudier son comportement. Nous avons favorisé l'approche expérimentale au détriment de l'approche analytique, en raison de la méthode de

découpe qui peut engendrer des défauts de rectitude et des contraintes résiduelles, effets qui sont difficiles à modéliser. Néanmoins, nous avons eu recours à simulations numériques avec le logiciel ADINA afin de déterminer le rayon de la zone de transition. Nous nous sommes cependant limité aux résultats obtenus d'analyses élastiques. Les résultats obtenus de ce programme expérimental favorisaient la suite de l'investigation au niveau d'ajouter les fusibles aux diagonales. En ce sens, la migration des contraintes est adéquate puisque nous avons pu observer une plastification constante sur toute la longueur de la section réduite des cornières. De plus, pour tous les spécimens, la rupture s'est produite à l'extérieur de la zone de transition ce qui nous indique que les rayons ont su faire migrer les contraintes adéquatement. La rupture pour tous les spécimens s'est produite au droit de l'aire la plus réduite et est causée par les défauts de rectitude découlant de la découpe au chalumeau. À cet effet, il est recommandé de porter une attention particulière lors de la découpe des spécimens, puisqu'il a été observé que la section la plus réduite survenait souvent à la sortie de la zone de transition. Une autre solution pour s'assurer que de la rectitude des spécimens est de faire usiner les fusibles. Ces spécimens ont su démontrer un meilleur comportement que ceux découpés au chalumeau, et ce, en plus de réduire le facteur d'écrouissage. Par contre, nous sommes au fait que l'usinage des pièces peut entraîner des frais et des délais supplémentaires, et il serait au bon jugement de l'ingénieur de choisir l'approche la plus adaptée aux besoins du projet.

Finalement, le deuxième programme expérimental avait pour objectif d'étudier le comportement des fusibles lorsque ajoutés aux diagonales. Nous avons procédé à l'essai de quinze (15) diagonales. La première consistait en une diagonale sans qu'aucun fusible ne soit ajouté. Cet essai est important à réaliser puisqu'il indique le comportement cyclique à imiter pour les autres essais qui auront des fusibles. De plus, pour les diagonales qui auront exhibé un comportement cyclique adéquat, l'essai de la diagonale sans fusible nous permettra d'évaluer le potentiel d'économie pouvant être réalisé.

Nous voulions aussi dans le cadre de ce programme expérimental, évaluer les solutions proposées par la pratique. Plusieurs recherches antérieures ont su démontrer que le recours à des ouvertures sur les parois des profilés tubulaires n'était pas une solution adéquate en raison d'une rupture prématurée sous un chargement cyclique s'expliquant par une concentration de contrainte autour de l'ouverture. Néanmoins, pour des fins de comparaison, nous avons décidé de reprendre certaines géométries d'ouvertures pour lesquelles nous les avons soumises à des chargements cycliques. Autant pour les ouvertures circulaires, ovalisées et multiples, une concentration de contraintes se produisait au droit de l'ouverture, entraînant une rupture prématurée de ces spécimens. Suivant les résultats obtenus pour ces spécimens, il est évident que nous ne recommandons pas l'utilisation de cette approche lors de la conception des diagonales.

Alternativement à la solution de recourir à des ouvertures, nous proposons d'utiliser un fusible qui est formé par l'arrangement de quatre cornières. Nous avons proposé deux approches pour la conception de ces fusibles. Suivant la philosophie choisie pour la détermination de la géométrie du fusible, nous avons pu établir les bornes supérieures et inférieures de l'économie pouvant être atteinte. Néanmoins, peu importe la philosophie choisie, nous avons observé un comportement adéquat de ces spécimens sous un chargement cyclique.

Même que certains spécimens ont su démontrer une meilleure longévité à un chargement cyclique par rapport à la diagonale sans fusible, ce qui nous a fait miroiter la possibilité de nous soustraire à la vérification des rapports b/t . Cependant, nous avons remarqué que cette soustraction n'était pas possible suivant un essai qui s'est soldé par la rupture du profilé tubulaire, en raison du voilement local de ses parois.

Pour tous ces spécimens, et comme nous nous attendions, nous avons pu noter une réduction significative de leurs résistances en traction, ce qui pourra engendrer des économies aux composantes structurales adjacentes. Cependant, nous avons aussi noté une réduction dans la résistance en compression des diagonales de l'ordre de 20%.

Suivant notre recherche, nous pensons que l'utilisation des fusibles formés par l'agencement de quatre cornières soit une approche qui s'intègre bien à la philosophie de la conception par capacité tel qu'exigé à la norme S16. Leur utilisation permettra de produire des économies lors de la conception de contreventements travaillant en tension-compression, favorisant majoritairement les bâtiments à grandes superficies et à faibles hauteurs. Néanmoins, il serait certainement intéressant d'évaluer leur utilisation dans des bâtiments multi étagés. Cependant, malgré qu'un fusible soit ajouté, les contreventements travaillant en traction seulement demeurent, à ce jour, l'approche la plus économique.

De plus, comme nous l'avons mentionné, nous avons établi dans ce document, les bornes inférieures et supérieures. Dans la suite des recherches, il serait intéressant d'établir un niveau d'économie acceptable et ainsi pouvoir établir des équations paramétriques qui pourront uniformiser l'utilisation de ces fusibles, et ainsi, pouvoir compter sur un niveau de confiance constant.

Finalement, nous avons noté une réduction dans la résistance en compression des diagonales auxquelles nous avons ajouté un fusible formé de l'agencement des quatre cornières. Nous pensons que cette situation devra être investiguée dans la suite des recherches, puisque dans nos hypothèses de conception, les fusibles ne sont conçus que pour la traction, et par conséquent, nous ne devons pas altérer la résistance en compression des diagonales. Le fait d'avoir sectionné le profilé tubulaire et l'épaisseur des plaques de la boîte de confinement sont des sources possibles de cette perte de résistance.

BIBLIOGRAPHIE

NBCC. 2005. National Building Code of Canada. Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa, Ont.

CSA. 2001a. Limit states design of steel structures. Standard CSAS16-01, Canadian Standards Association, Rexdale, Ont.

CSA. 2005. Supplement No.1 to CAN/CSA-S16-01, Limit States Design of Steel Structures. Canadian Standards Association, Rexdale, Ont.

Tremblay, R., Archambault, M.H, and Filiatrault, A. 2003. Seismic response of concentrically braced steel frames made with rectangular hollow bracing members. Journal of Structural Engineering, ASCE, 129(12):1626-1636

Rezai, M., Prion, H.G.L., Tremblay, R., Bouatay, N., and Timler, P., Seismic performance of brace fuse elements for concentrically steel braced frames. Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, Mazzolani & Tremblay (eds), 2000, Balkema, Rotterdam.

Tremblay, R. et Bouatay, N. 1999. Pilot Testing on Ductile Yield Plate Fuses for HSS Braces Intended for Low-Rise Buildings – Phase I: Full-Scale Testing of Prototype Brace Fuse Detail. Report CDT/ST99-05, Dept. of Civil, Mining and Geological Engineering, Ecole Polytechnique, Montreal, Canada.

Rezai, M., Prion, H.G.L., and Timler, P. 1999. Pilot Testing of Fuse Details for HSS Bracing Members (Phase II), Dept. of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, B.C.

Tremblay, R., Bouatay, N., Pilot testing on ductile yield plate fuses for HSS braces

intended for low-rise buildings Phase III Full-scale testing of prototype brace fuse detail, CISC, 1999

Tremblay, R., Rogers, C.A., Impact of capacity design provisions and period limitations on the seismic design of low-rise steel buildings, Steel Structure 5 (2005) 1-22

Shaback B., Brown, T., Behaviour of square hollow structural steel braces with end connections under reversed cyclic axial loading, 2003, Canadian Journal of Civil Engineering 30: 745-753

Mitchell, D., Tremblay, R., Karacabeyli, E., Paultre, P., Saatcioglu, M., Anderson, D.L., Seismic force modification factors for the proposed 2005 edition of the National Building Code of Canada, 2003, Canadian Journal of Civil Engineering 30: 308-327

Atkinson, G.M., and Beresnev, I.A. 1998. Compatible ground motion time histories for new national seismic hazard maps. Canadian Journal of Civil Engineering, 25: 305–318.

Adams, J., and Atkinson, G. 2003. Development of seismic hazard maps for the proposed 2005 edition of the National Building Code of Canada. Canadian Journal of Civil Engineering, 30: 255–271.

Archambault, M.-H. 1995. Étude du comportement séismique des contreventements ductiles en X avec profiles tubulaires en acier. Report EPM/GCS-1995-09, Department of Civil Engineering, École Polytechnique, Montréal, Que.

ANNEXES**ANNEXE A : PROGRAMME EXPÉRIMENTAL NO.1****AIRES DE LA SECTION À CHACUNE DES LIGNES**

Spécimen 2-3A

Ligne	Aire <i>mm²</i>	Ligne	Aire <i>mm²</i>
1	608.192	27	445.44
2	609.6	28	445.888
3	607.104	29	445.184
4	607.744	30	444.736
5	608.896	31	447.488
6	614.208	32	450.816
7	613.952	33	451.008
8	552	34	452.352
9	484.352	35	453.824
10	446.208	36	454.656
11	429.056	37	454.336
12	448.64	38	453.824
13	452.48	39	453.76
14	456.448	40	452.48
15	455.744	41	449.856
16	455.552	42	452.736
17	454.208	43	475.52
18	452.928	44	520.064
19	452.16	45	593.088
20	451.072	46	599.04
21	450.112	47	604.864
22	448.192	48	609.344
23	447.552	49	609.984
24	447.104	50	611.776

Ligne	Aire <i>mm²</i>	Ligne	Aire <i>mm²</i>
25	440.768	51	606.08
26	445.376	52	606.72

Spécimen 3-2A

Ligne	Aire <i>mm²</i>	Ligne	Aire <i>mm²</i>
1	604.992	27	456
2	607.488	28	454.592
3	609.92	29	452.608
4	609.024	30	452.288
5	611.776	31	453.824
6	611.008	32	452.288
7	608.576	33	453.184
8	538.112	34	453.952
9	474.944	35	454.72
10	449.088	36	453.824
11	442.688	37	452.672
12	445.568	38	449.6
13	448.576	39	448.128
14	450.368	40	446.976
15	455.424	41	440.064
16	457.024	42	441.088
17	458.88	43	470.272
18	459.456	44	512.256
19	457.792	45	623.744

Ligne	Aire <i>mm²</i>	Ligne	Aire <i>mm²</i>
20	455.744	46	615.808
21	455.04	47	610.496
22	455.68	48	616.448
23	457.472	49	613.12
24	456.448	50	613.76
25	455.744	51	613.056
26	455.104	52	616.576

Spécimen 4-1B

Ligne	Aire, <i>mm²</i>	Ligne	Aire, <i>mm²</i>
1	611.328	40	457.408
2	610.432	41	453.824
3	608.832	42	453.376
4	612.288	43	453.888
5	610.304	44	454.912
6	609.024	45	458.048
7	608.384	46	457.92
8	583.936	47	458.688
9	517.568	48	459.52
10	455.424	49	460.352
11	453.888	50	459.584
12	455.296	51	458.816
13	455.104	52	458.816
14	457.344	53	457.344
15	453.76	54	456.256
16	455.232	55	452.8
17	457.856	56	448.896
18	459.776	57	447.04

Ligne	Aire, mm^2	Ligne	Aire, mm^2
19	461.696	58	447.744
20	460.48	59	445.312
21	459.904	60	447.04
22	459.904	61	441.344
23	459.008	62	441.792
24	457.28	63	442.112
25	462.528	64	443.456
26	462.208	65	441.664
27	456.384	66	439.424
28	457.088	67	451.84
29	459.136	68	488.448
30	460.48	69	558.848
31	457.024	70	609.344
32	453.248	71	607.488
33	450.816	72	607.424
34	452.352	73	608.128
35	451.84	74	611.776
36	452.16	75	611.648
37	453.184	76	610.816
38	454.016	77	604.992
39	456.192		

Spécimen 5-2B

Ligne	Aire, mm^2	Ligne	Aire, mm^2
1	609.28	40	446.592
2	610.624	41	448.32
3	608.32	42	448.576
4	605.696	43	450.176
5	606.848	44	448.448
6	605.824	45	449.536

Ligne	Aire, mm ²	Ligne	Aire, mm ²
7	607.104	46	448.704
8	566.272	47	449.472
9	491.648	48	451.712
10	447.104	49	452.16
11	441.92	50	451.904
12	445.632	51	452.992
13	448.64	52	454.016
14	449.088	53	454.976
15	450.496	54	454.72
16	450.816	55	450.368
17	451.008	56	450.944
18	451.2	57	452.352
19	451.008	58	457.472
20	451.776	59	457.664
21	453.056	60	455.488
22	452.032	61	454.912
23	452.992	62	456.32
24	451.008	63	453.568
25	449.792	64	449.088
26	450.944	65	443.072
27	449.728	66	445.12
28	450.496	67	471.68
29	451.136	68	519.936
30	450.624	69	600
31	450.24	70	614.4
32	450.368	71	612.992
33	449.984	72	610.368
34	450.752	73	609.664
35	451.584	74	609.152
36	450.688	75	613.184
37	447.744	76	613.312

Ligne	Aire, mm^2	Ligne	Aire, mm^2
38	444.224	77	607.552
39	447.04		

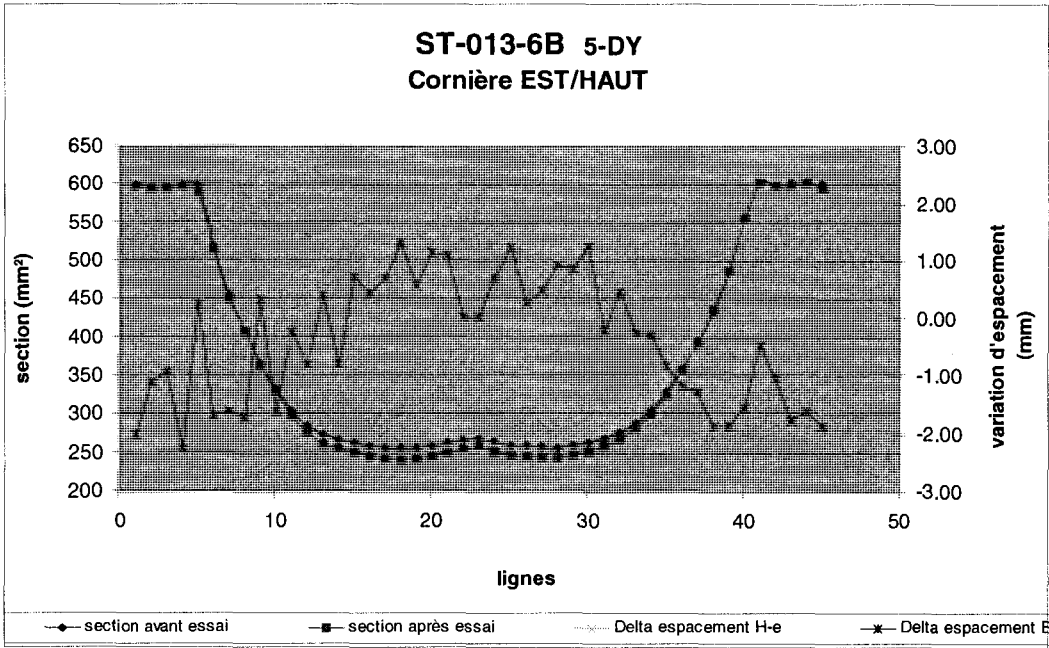
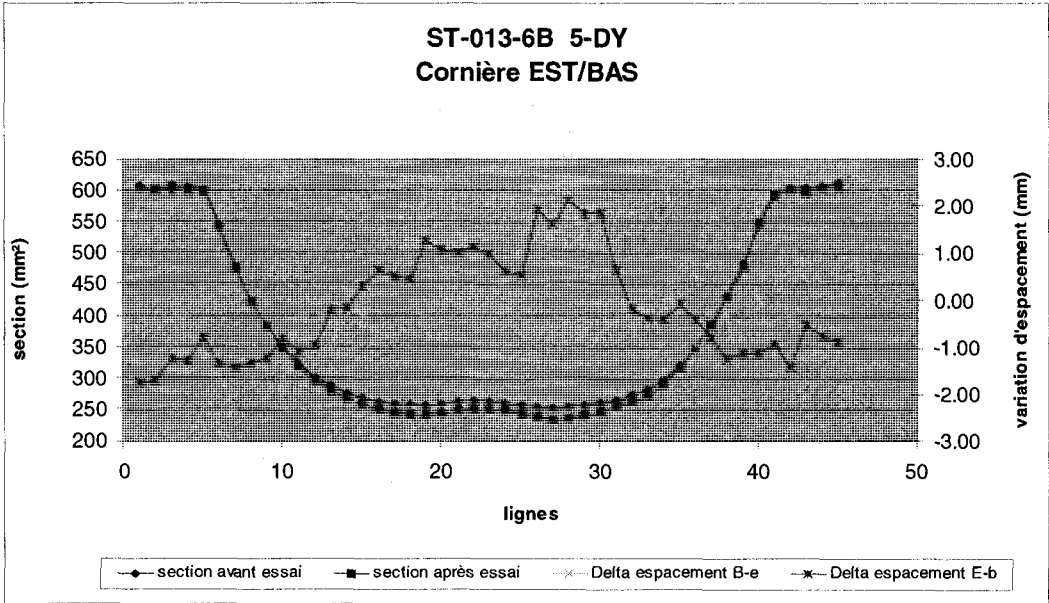
Spécimen 6-3B

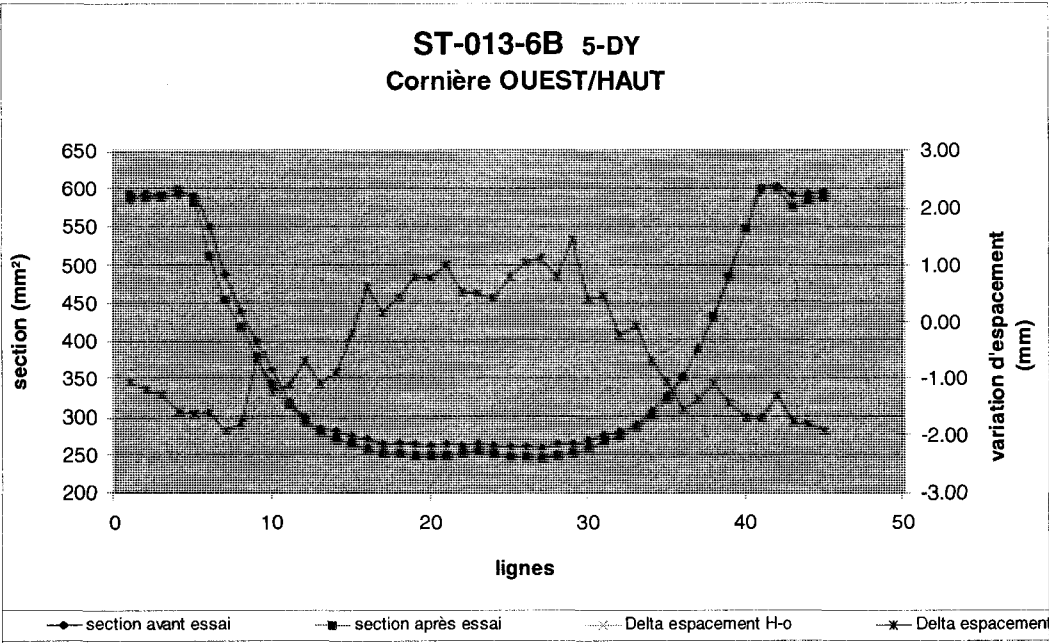
Ligne	Aire, mm^2	Ligne	Aire, mm^2
1	607.808	40	445.824
2	608.64	41	443.648
3	609.28	42	442.752
4	607.168	43	441.408
5	608.448	44	439.04
6	609.92	45	439.936
7	611.008	46	442.176
8	602.368	47	441.408
9	511.168	48	441.92
10	470.656	49	442.24
11	442.176	50	443.84
12	436.864	51	444.672
13	438.208	52	444.672
14	438.912	53	446.528
15	444.416	54	447.744
16	441.664	55	448.32
17	444.096	56	448.064
18	437.12	57	447.04
19	435.328	58	446.72
20	436.928	59	446.08
21	440.576	60	446.592
22	443.328	61	444.736
23	445.248	62	444.672
24	446.336	63	443.648
25	443.328	64	444.416

Ligne	Aire, mm^2	Ligne	Aire, mm^2
26	440.128	65	442.56
27	441.152	66	438.272
28	441.92	67	438.784
29	441.984	68	451.456
30	442.176	69	497.088
31	441.024	70	567.616
32	440.704	71	609.216
33	442.624	72	608.384
34	443.328	73	608
35	449.408	74	609.6
36	451.2	75	612.032
37	451.968	76	611.968
38	448.448	77	611.008
39	448		

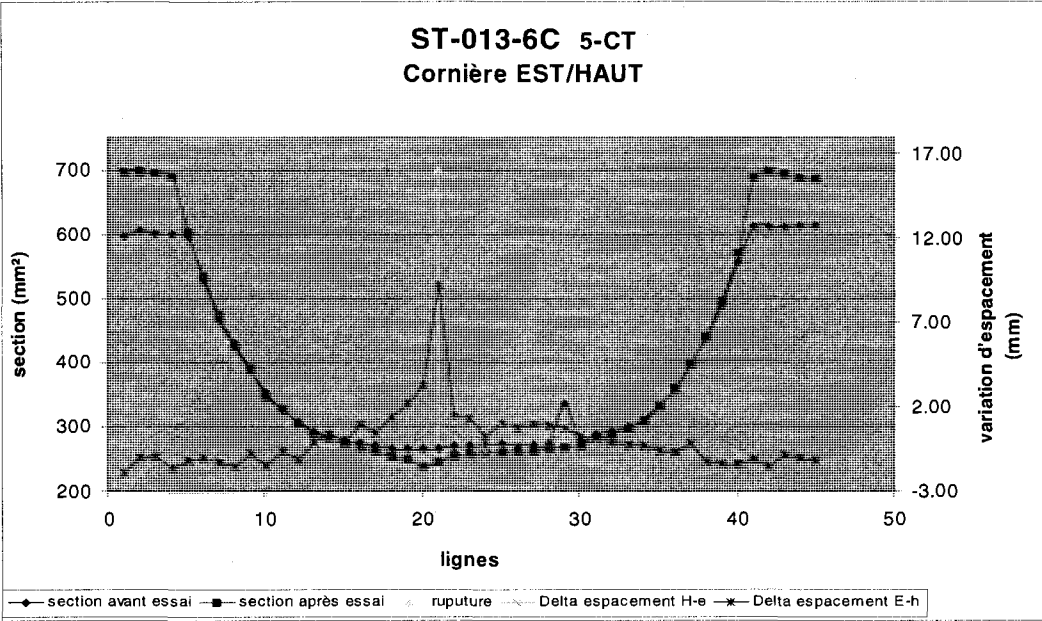
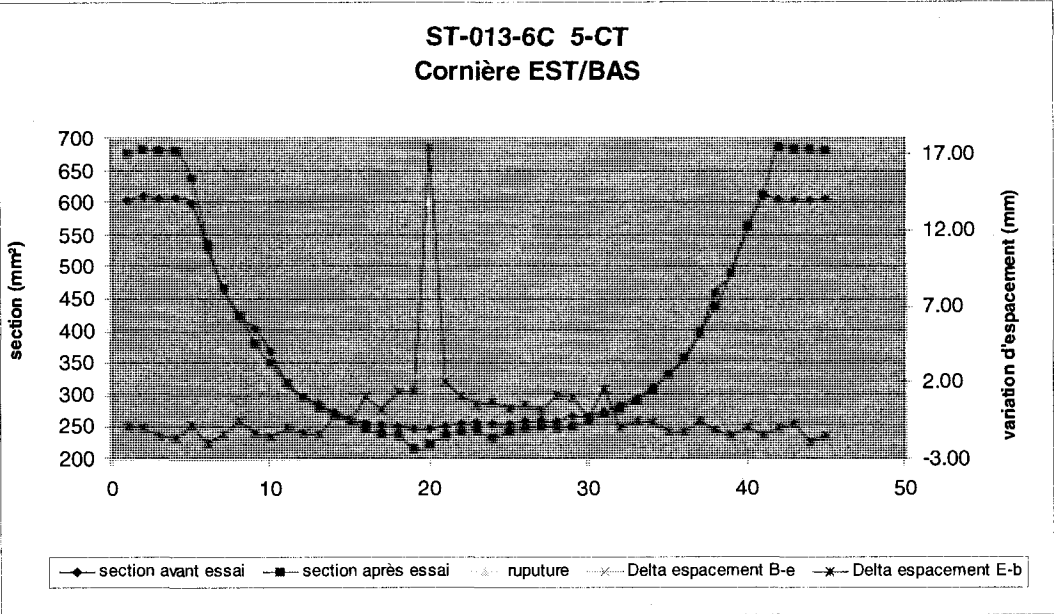
ANNEXE B : PROGRAMME EXPÉRIMENTAL NO.2**GRAPHIQUES DES MESURES PRISES AVANT ET APRÈS LES ESSAIS**

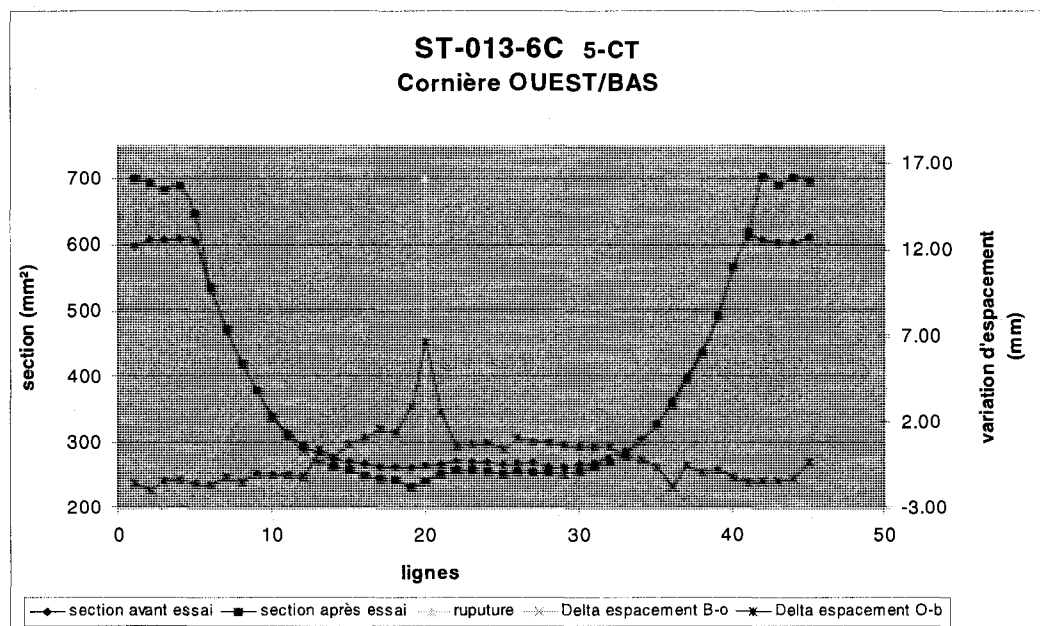
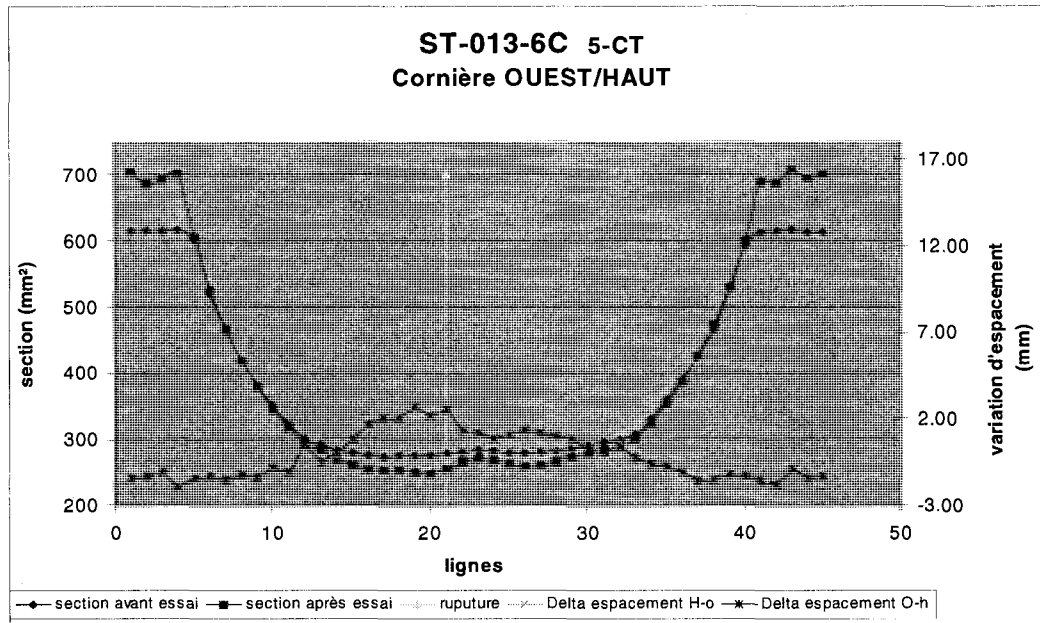
5-DYN



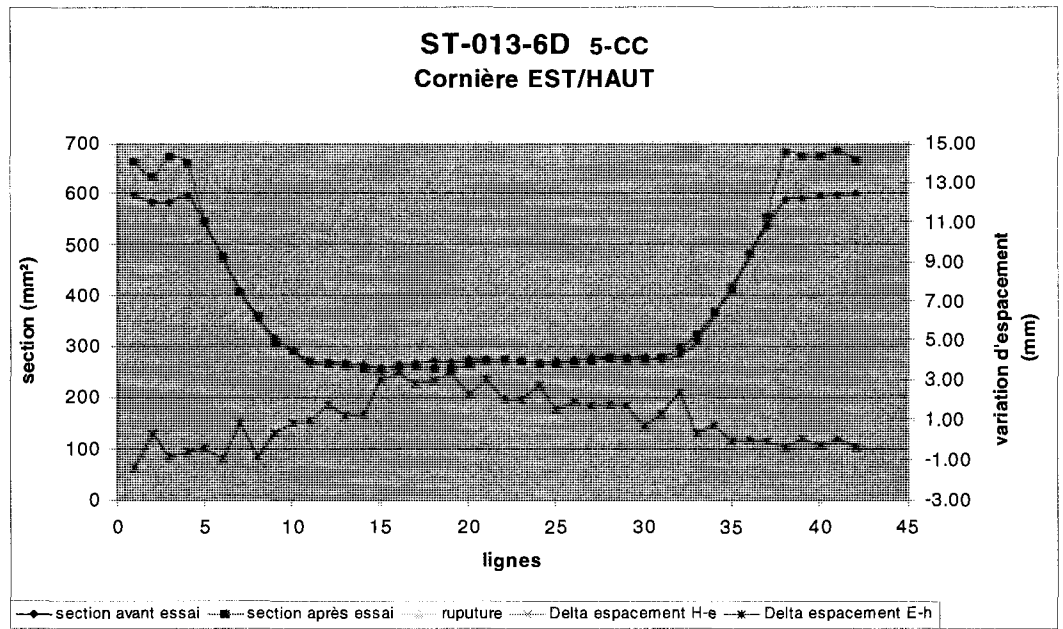
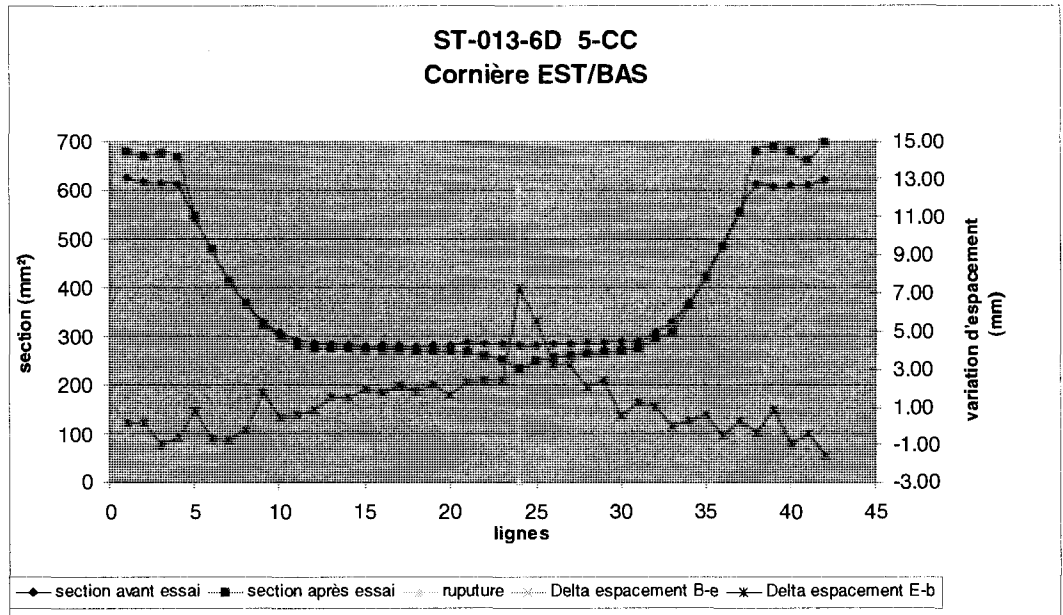


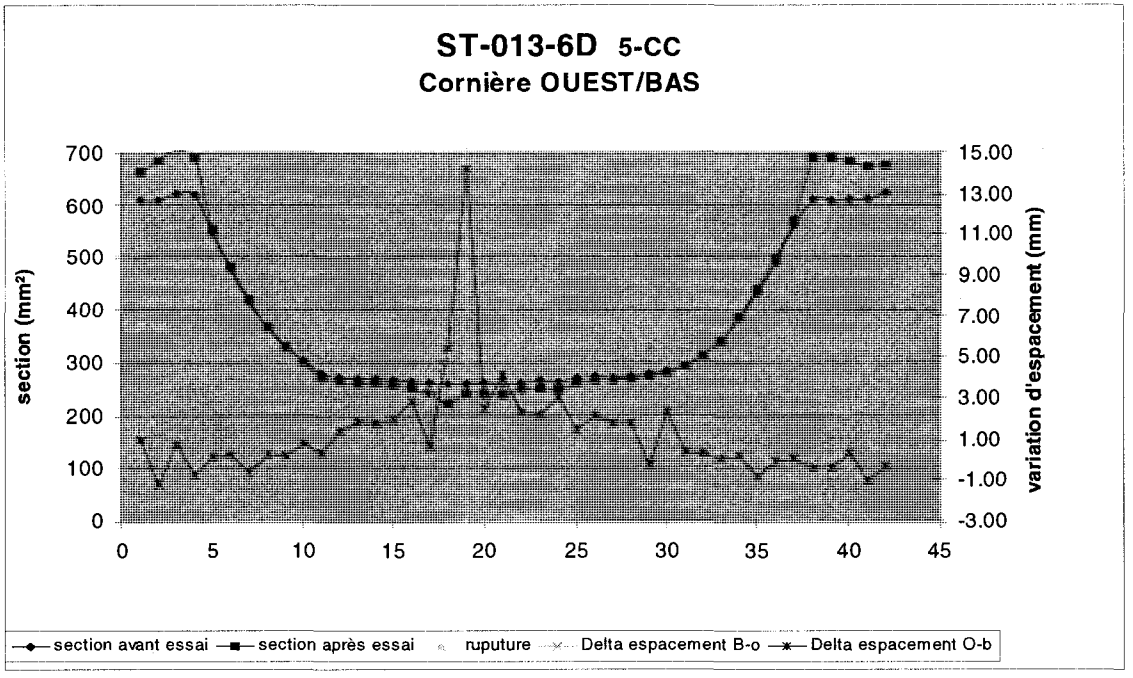
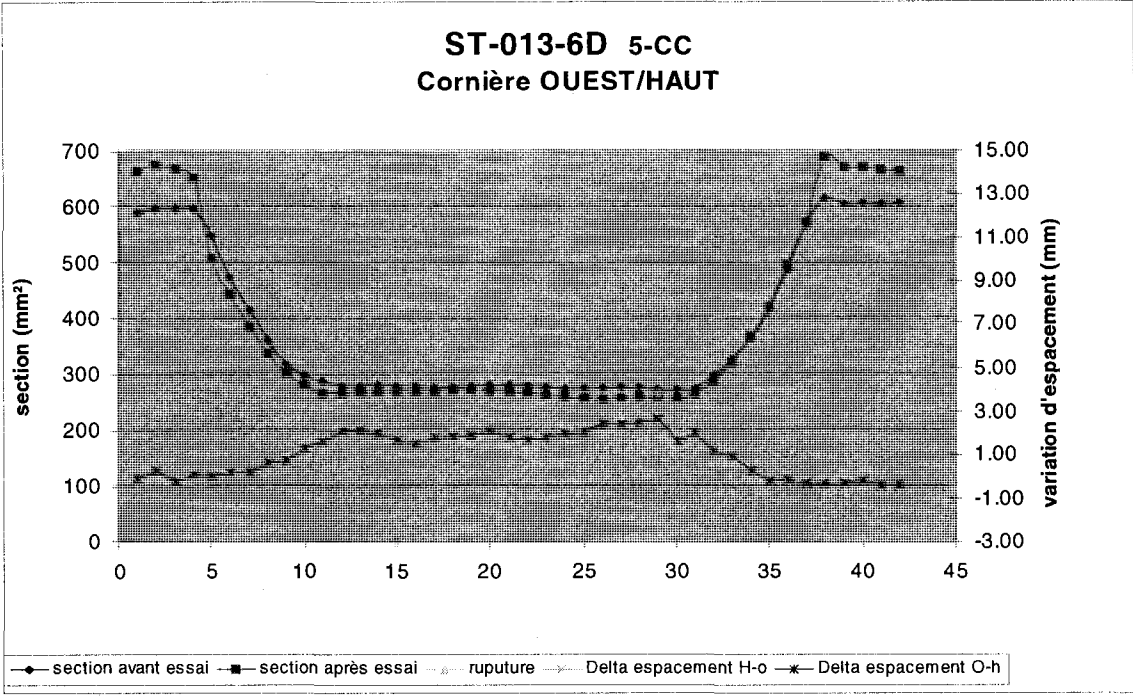
5-CT



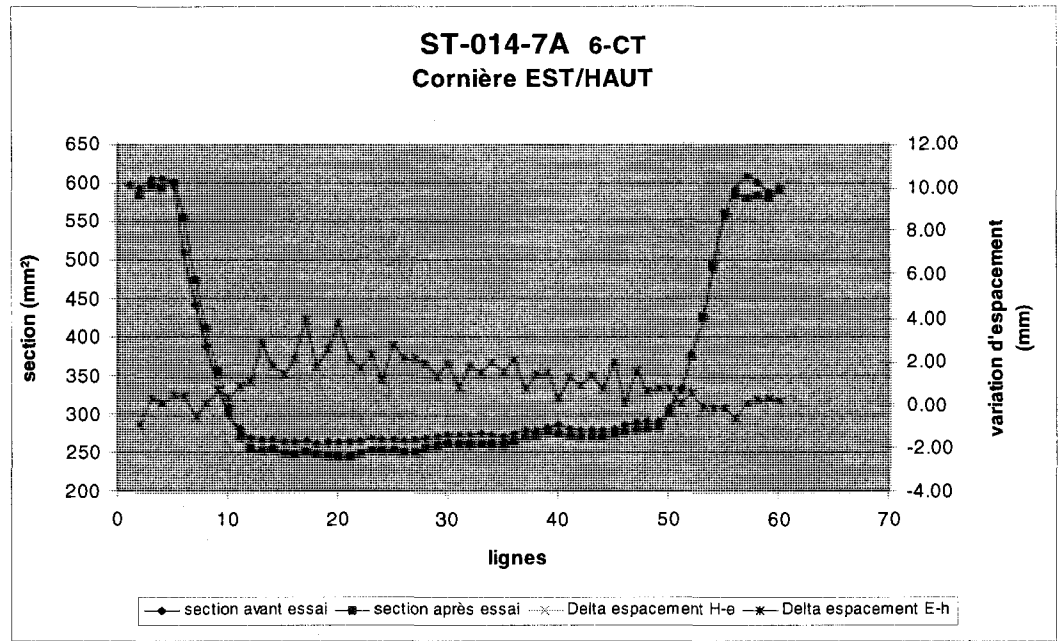
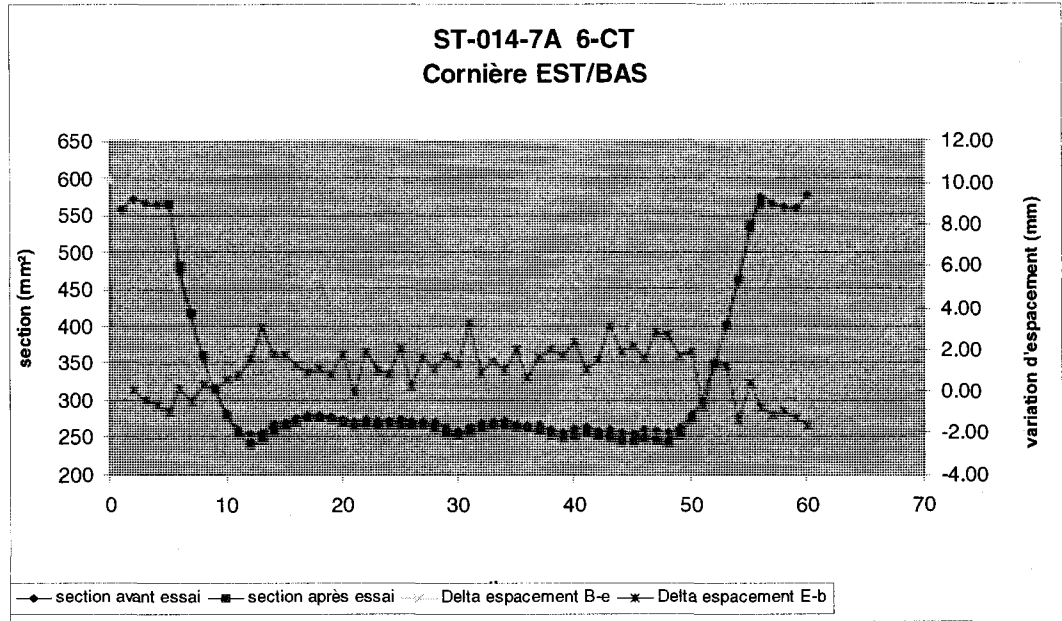


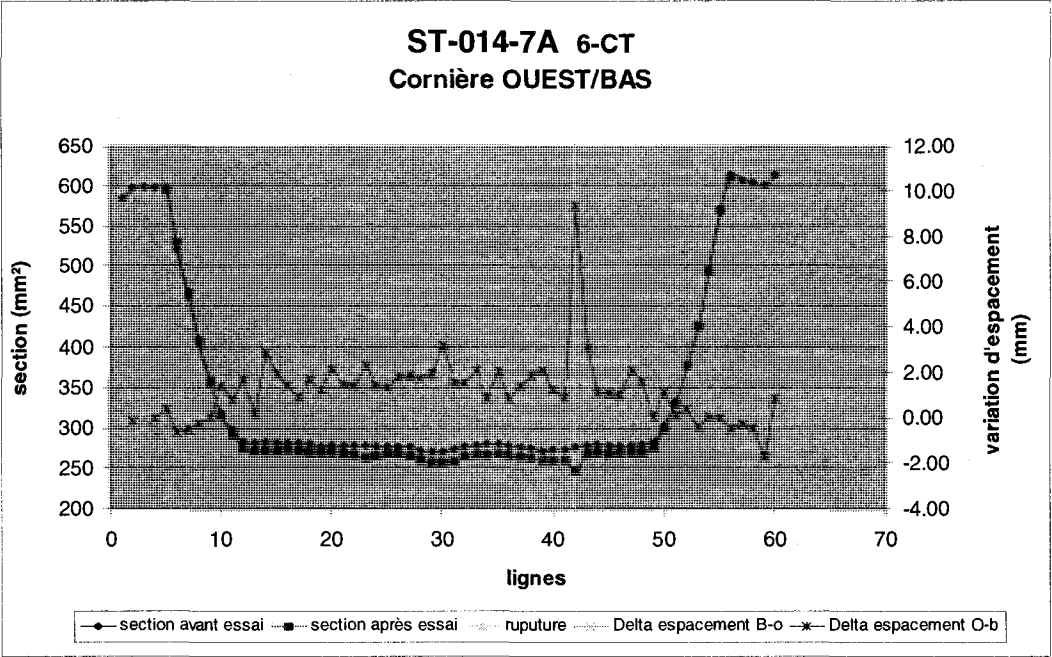
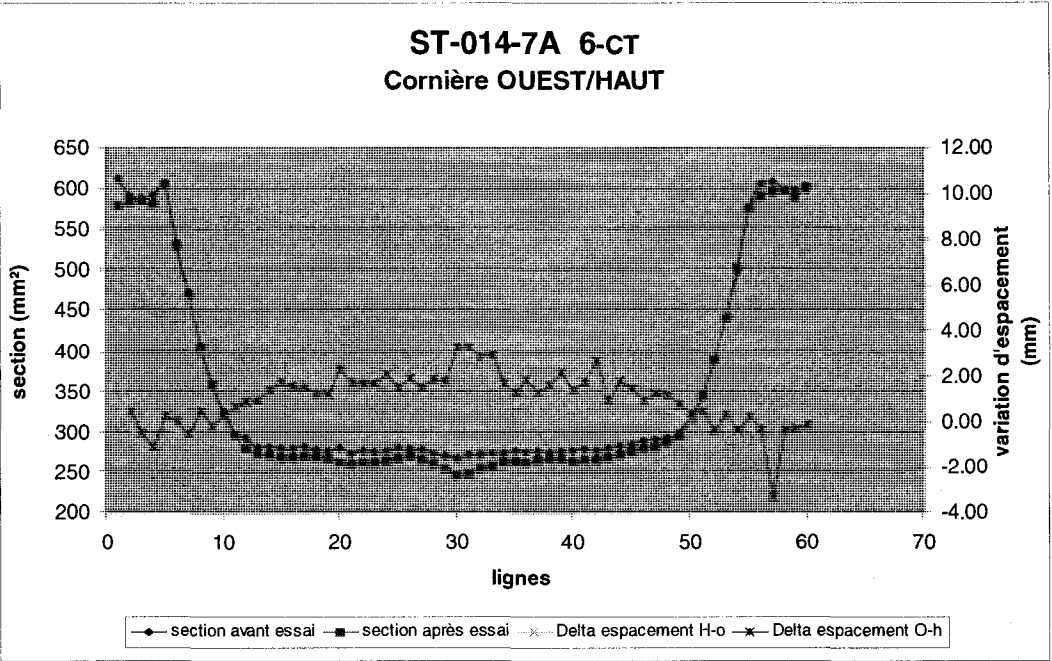
5-CC



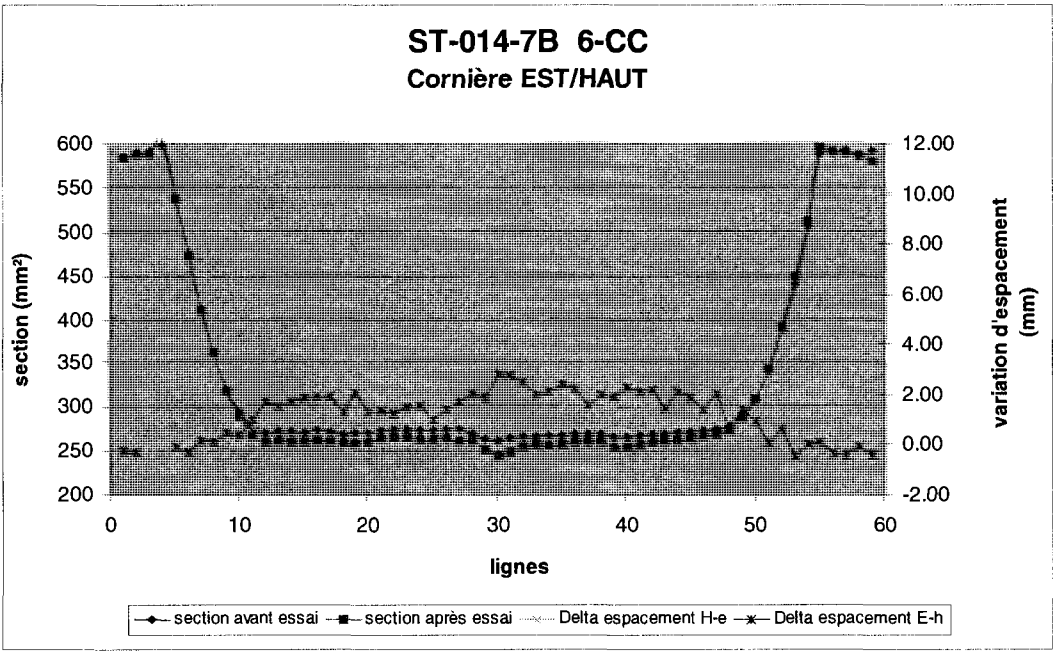
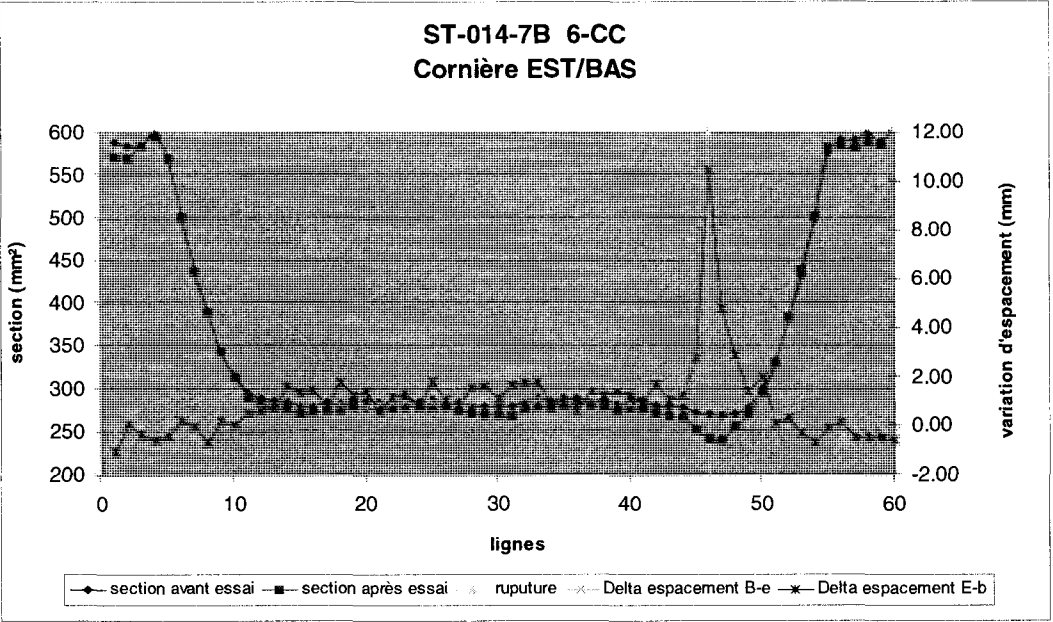


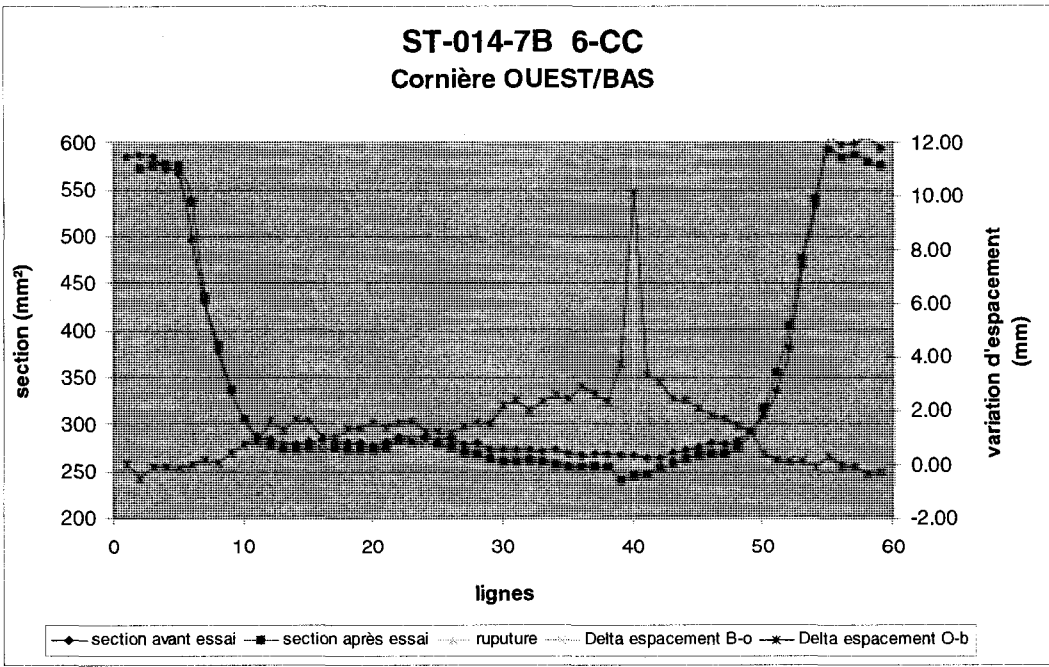
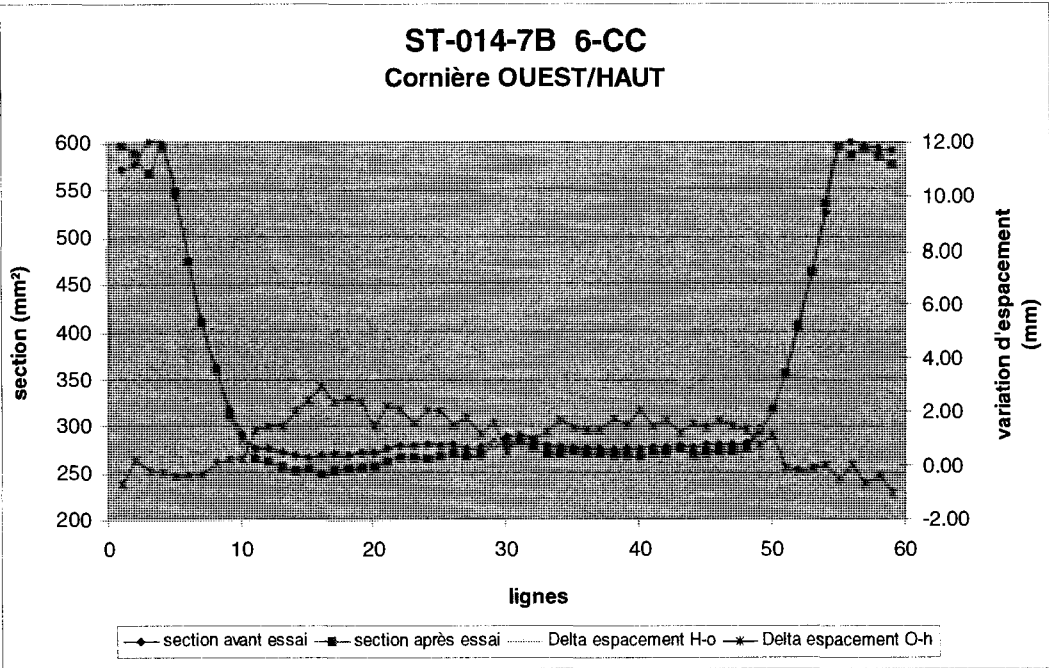
6-CT



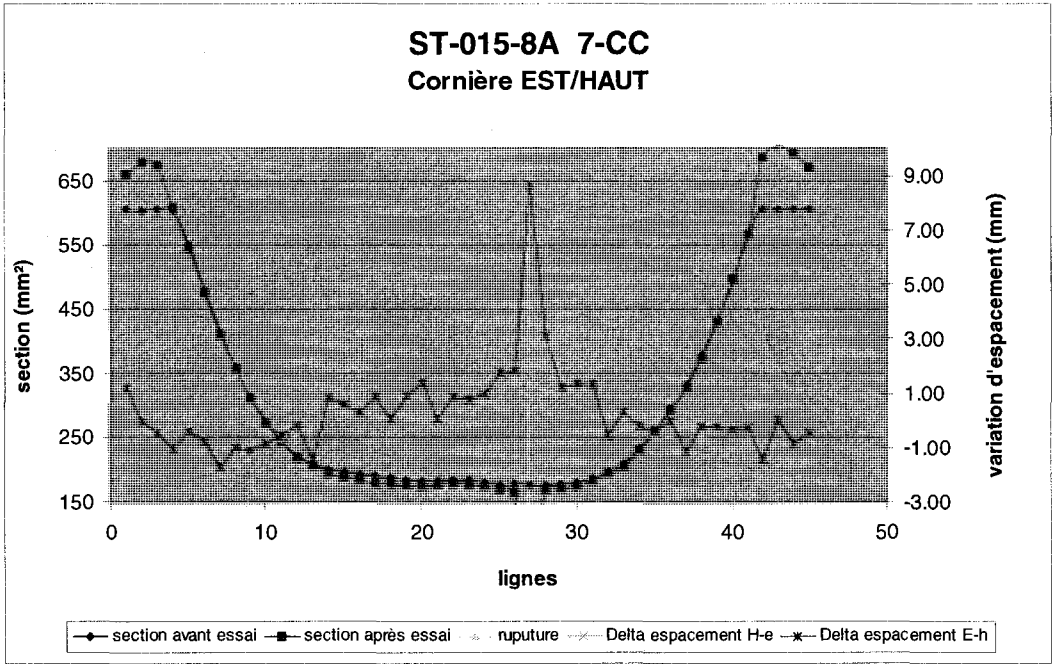
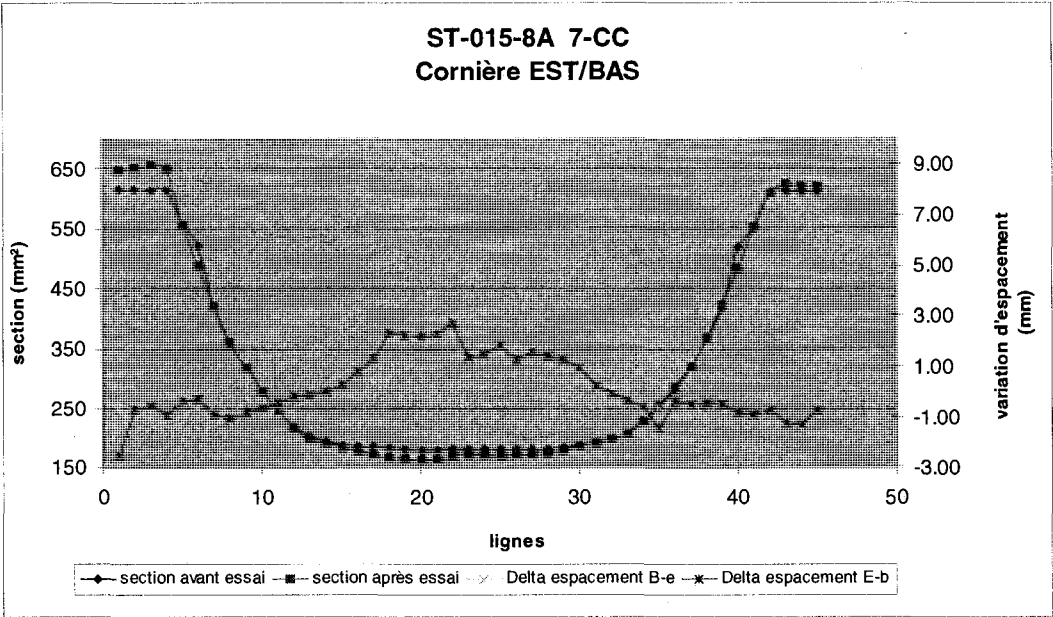


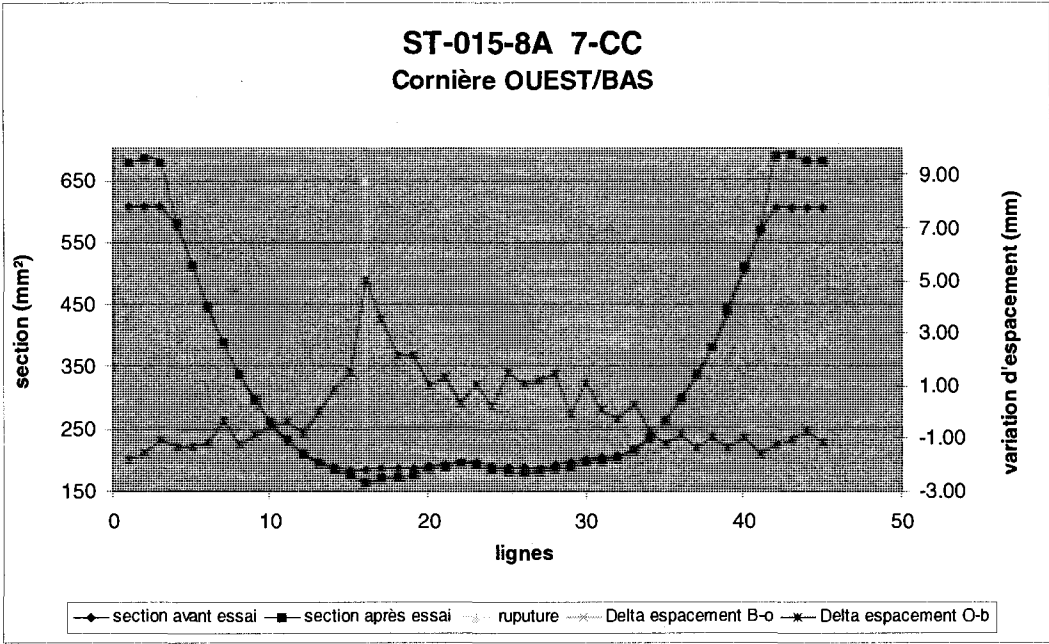
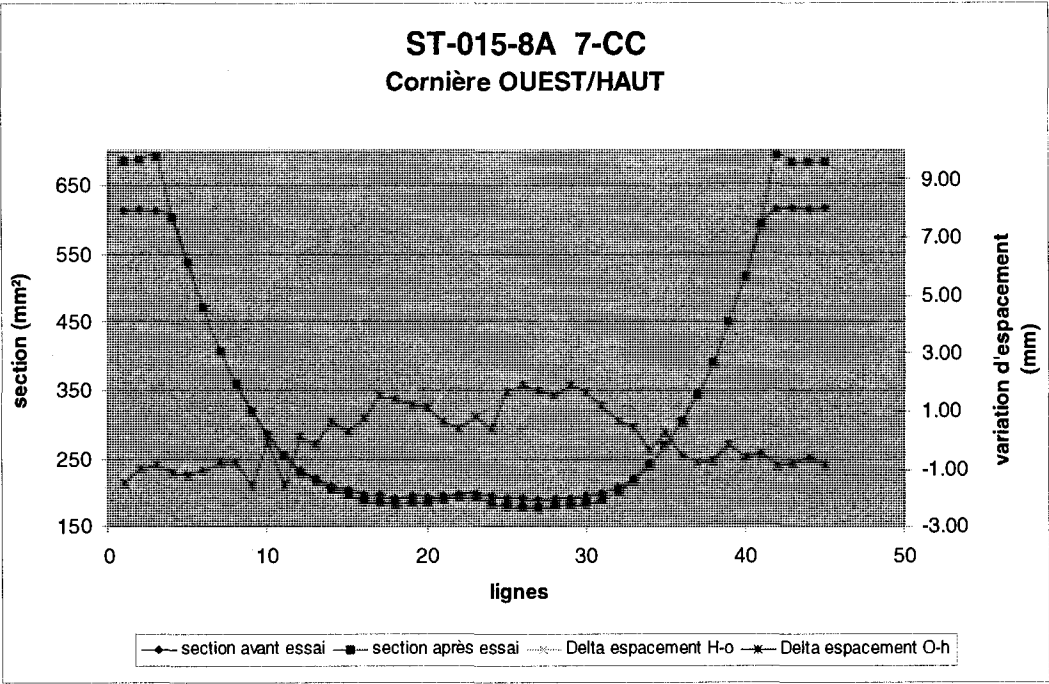
6-CC



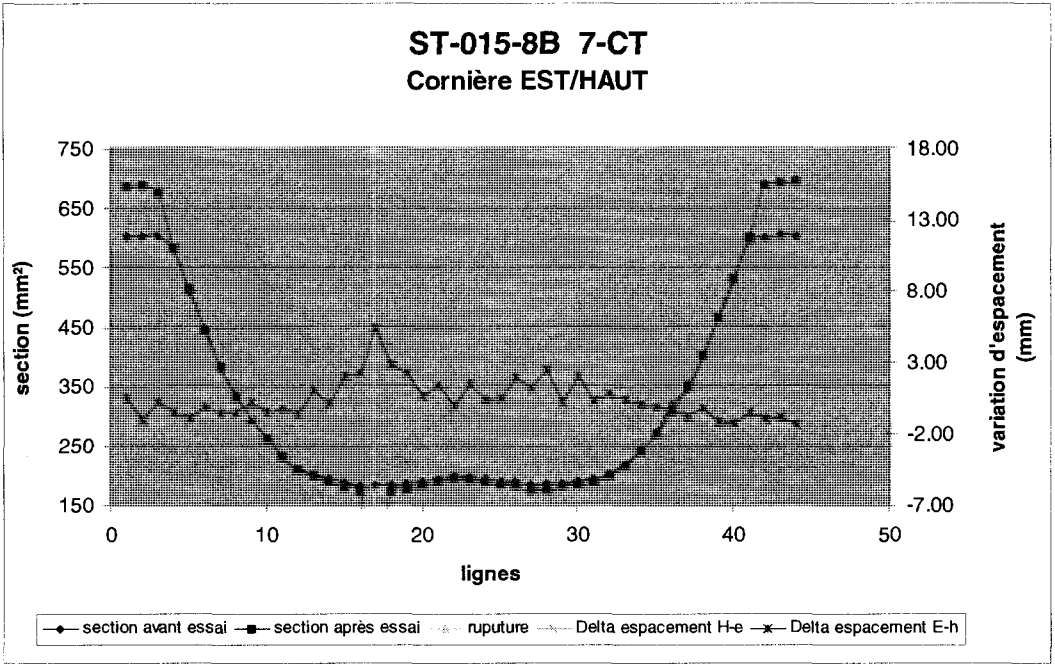
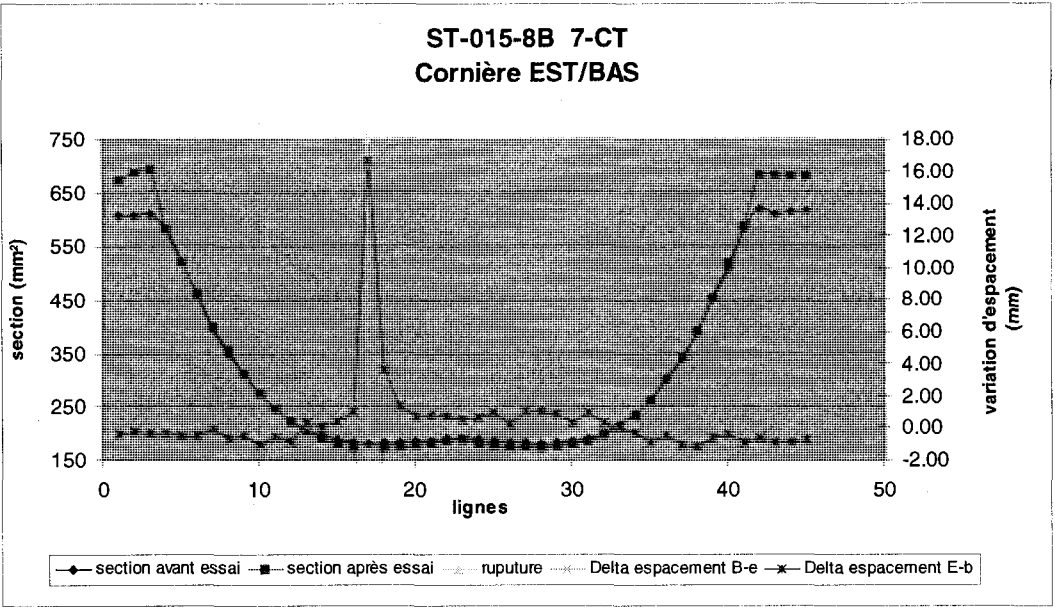


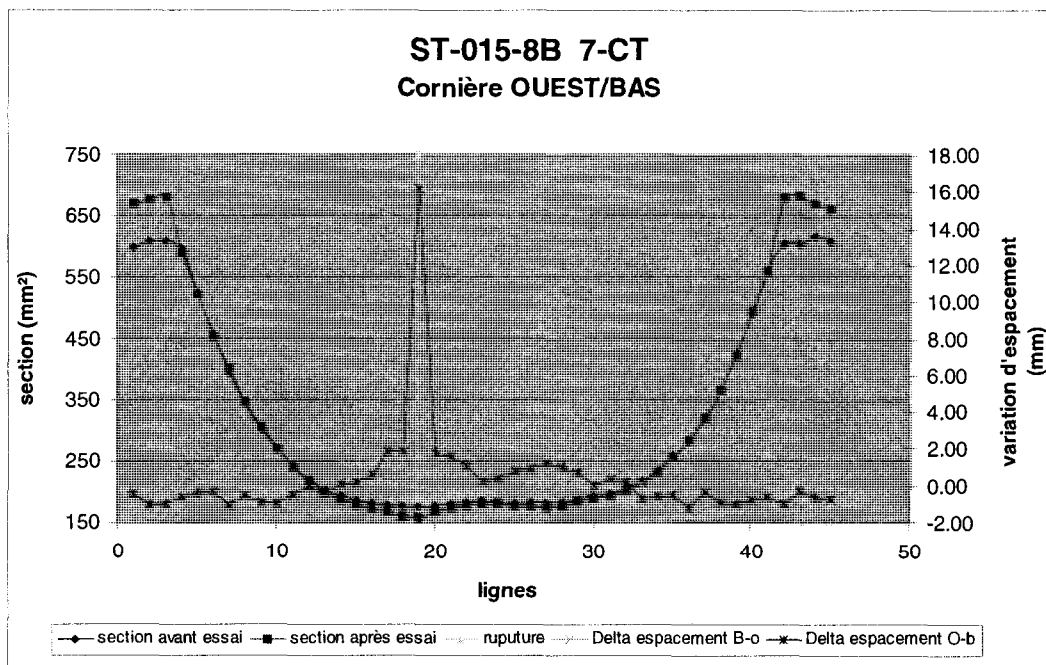
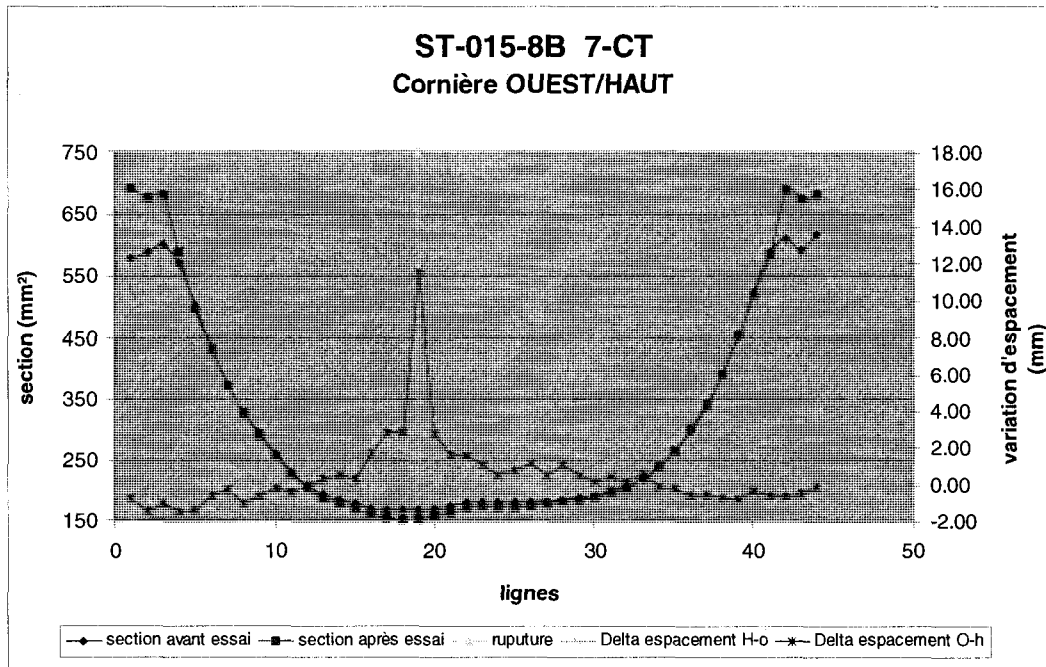
7-CC





7-CT





8-CT

