

Analyse expérimentale et numérique du comportement des joints des poutres en treillis métalliques de section rectangulaire creuse

Experimental and numerical analysis of the behavior of the joints in rectangular hollow section trusses

Fayçal Slimani^{*1}, Bachir Redjel¹, Messaoud Saidani² & Bachir Kebaili¹

¹ Laboratoire de Génie Civil (LGC), Département de Génie Civil Annaba, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.

² School of the Built Environment, Coventry University, Priory Street, Coventry CV1 5FB, Warwickshire, United Kingdom.

Soumis le : 23/10/2017

Révisé le : 10/12/2017

Accepté le : 25/01/2018

ملخص

تم إجراء دراسة تجريبية على روافد بحجم حقيقي معدنية مستطيلة ذات مقاطع جوفاء، رقيقة الجدران، على الفواصل K المتداخلة بالكامل، لديهم نفس المقاطع و هندسة بين التحقيق مختلفة. تم الجمع العددي D3 للتحقق من صحة، مما جعل من الممكن لوضع تقييم مقارن للسلوك. و يبدو أن زاوية قطري مع الإطار وآلية إغراق الحزمة هما في الأصل سبب الاختلاف بين قيم السهم التي هي أكبر من تلك التي حصل عليها التحليل العددي.. هذا النمط من الخراب لا يزال الأكثر شيوعا لوحظ على الفواصل ذات حبال رقيقة الجدران. **كلمات مفتاحية:** المفاصل - عوارض معدنية - مقاطع مستطيلة جوفاء - متداخلة - انحناء

Résumé

Une étude expérimentale menée sur des joints de poutres métalliques en treillis de section rectangulaire creuse à parois mince a été conduite sur des poutres avec des joints à recouvrement complet et à échelle réelle, présentant les mêmes sections et une géométrie différente. Une investigation numérique en 3 D pour validation a été conjuguée, ce qui a permis de dresser un bilan comparatif du comportement. Il apparaît que l'angle de la diagonale avec la membrure et le mécanisme de déversement de la poutre sont à l'origine de la divergence entre les valeurs de la flèche qui sont supérieures à celles obtenues par l'analyse numérique. Ce mode de ruine reste le plus fréquent observé sur les assemblages des membrures à parois minces.

Mots clés: Joints - poutre en treillis métallique - section rectangulaire creuse – recouvrement - flexion

Abstract

An experimental study of thin-walled rectangular hollow-section for steel lattice girder was conducted on overlapped K joints and full scale, with the same sections and different geometry. A numerical 3D investigation for validation was combined, which made it possible to draw up a comparative assessment of the behavior. It appears that the angle of the diagonal with the chord and the beam dump mechanism are at the origin of the divergence between the values of the arrow which are higher than those obtained by the numerical analysis. This mode of ruin remains the most frequent observed on the assemblies of the thin-walled chords.

Keywords: Joints – lattice girder - hollow rectangular section – Overlapped – bending

* Auteur correspondant : slimani_faycal@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Les poutres en treillis métalliques de section creuse structurelles sont des solutions très efficaces largement utilisées dans l'industrie de la construction en charpente métallique. Elles présentent un rapport résistance (ou rigidité) / poids très avantageux par rapport à celui indiqué dans les sections pleines et un aspect esthétique meilleur. Cependant ces poutres affichent des faiblesses qui se trouvent principalement dans les joints. Ces derniers façonnés par soudage sont ainsi le lieu de contraintes résiduelles qui viennent s'ajouter aux contraintes de service et conduisent à la ruine des poutres par plastification aux niveaux des joints.

Il est important de signaler que les profils creux rectangulaires n'ont cessé de faire l'objet de nombreuses études, recherches et investigations expérimentales et théoriques en Europe depuis les années 60. Parmi les recommandations sur les assemblages soudés de sections creuses rectangulaires (SCR), celles proposées par Eastwood & Wood [1, 2] restent les plus intéressantes. Une investigation systématique majeure sur SCC-SRC des joints soudés a été menée par Wardenier et Stark [3, 4] avec des conclusions significatives et définitives. Sur la base de ces résultats, ces auteurs proposent une série d'équations qui estiment la résistance ultime des joints pour des sections carré ou rectangulaire des treillis. Depuis lors, les méthodes de production des SRC en acier de construction ont changé du profilé laminé à chaud de section ronde puis quadratique, au profilé laminé à froid. Ces derniers trouvent leurs caractéristiques sensiblement modifiées par l'apport de la chaleur de soudage. Dans ce contexte, il paraît ainsi souhaitable de revoir les équations de conception existantes pour déterminer la résistance des joints. Ainsi des études ont été investiguées sur la résistance d'un joint en forme de T sur des sections rectangulaires creuses où la contrainte a atteint 350 MPa. Un guide a été publié sur le comportement des joints des SRC suite à des recommandations établies par International Institute of Welding (IIW) [5]. Le comportement de l'assemblage est trop complexe pour que l'on puisse tenir compte de tous les paramètres influents [6, 7, 8].

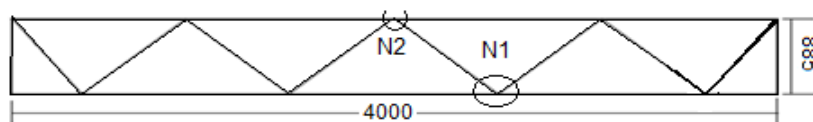
Cet article examine donc, le comportement des différents éléments constituant les joints, notamment, les relevés des déformations, des contraintes, des moments ainsi que des efforts mesurés et calculés suite à l'expérimentation, suivi d'une analyse numérique pour une validation. Il faut signaler que dans la plupart des recherches expérimentales et théoriques menées sur ce type de poutres, la partie majeure de leur programme était emportée sur des sections de 100x100 mm et de différentes épaisseurs de 4 et 5 mm [6]. D'après ces études les principaux paramètres qui ont définis la résistance des joints à recouvrement complet sont le rapport entre la largeur des diagonales et celle de la membrure, le rapport entre la largeur de la membrure et celle de son épaisseur et l'angle de la diagonale avec la membrure. Ainsi, sur la base de ces approches, une contribution comparative et croisée par la présente étude sur des sections creuses rectangulaires à parois mince, permettra certainement de mieux appréhender l'un des principaux paramètres gouvernant le comportement des joints des poutres de sections rectangulaires creuses et de définir le modèle analytique approprié à ce type de poutre. Les trois poutres testées ont ainsi permis de mener une étude comparative et approfondie sur leur comportement.

2. GEOMETRIE ET CARACTERISRIQUES DES POUTRES

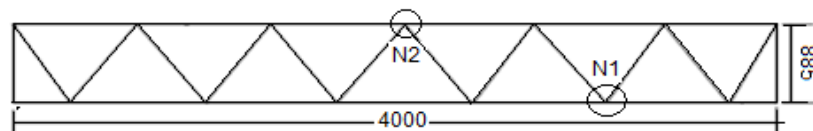
Un total de trois poutres à échelle réelle avec un recouvrement complet des diagonales au niveau des joints (P1, P2 et P3) fabriquées en acier S 235 ont été utilisés et testés. Ces poutres sont fournies par une entreprise située à Berrahal – Annaba (Algérie). De par leur forme qui s'inscrivait dans un système symétrique par rapport à leur centre, ces trois poutres présentaient une géométrie différente tout en gardant les mêmes sections des membrures et des diagonales. L'expérimentation a été menée sur une dalle d'essais avec un portique muni de deux vérins dont la capacité maximale est de 20 tonnes pour chacun.

La figure 1 montre un exemple de schématisation des trois poutres désignées P1, P2 et P3.

Poutre N°1 : dénommée **P1** avec 7 nœuds



Poutre N°2 : dénommée **P2** avec 11 nœuds



Poutre N°3 : dénommée **P3** avec 9 nœuds

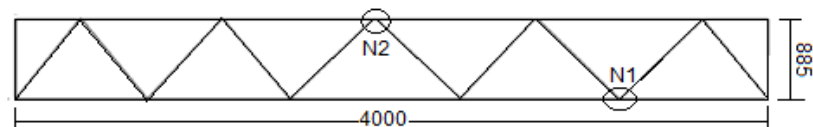


Figure 1 : Forme géométrique des poutres

Le tableau 1 résume les valeurs des dimensions géométriques et les sections des poutres.

Tableau 1. Dimensions des poutres et sections des éléments

Paramètres	unité (m)
Longueur totale	4
Hauteur totale	.885
Membrures et montants	70x50x2.5
Diagonales	60x30x2

L'acier utilisé est un acier de type S235 produit par l'entreprise de production sidérurgique Sider d'El Hadjar. Les caractéristiques physico mécaniques du produit sont fournis par le fabricant et qui se résument ainsi : Module de Young = 210 GPa - coefficient de poisson = 0,3 - masse volumique = 7850 Kg/m³.

3. PROTOCOLES ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

3.1 Caractéristiques géométriques des poutres

Un plan général et les différentes configurations des joints des poutres montées sur la dalle d'essais sont illustrées sur les figures 2 et 3.



Poutre 1

Poutre 2



Poutre 3

Figure 2 : Différents types de poutres montées sur le dispositif de chargement

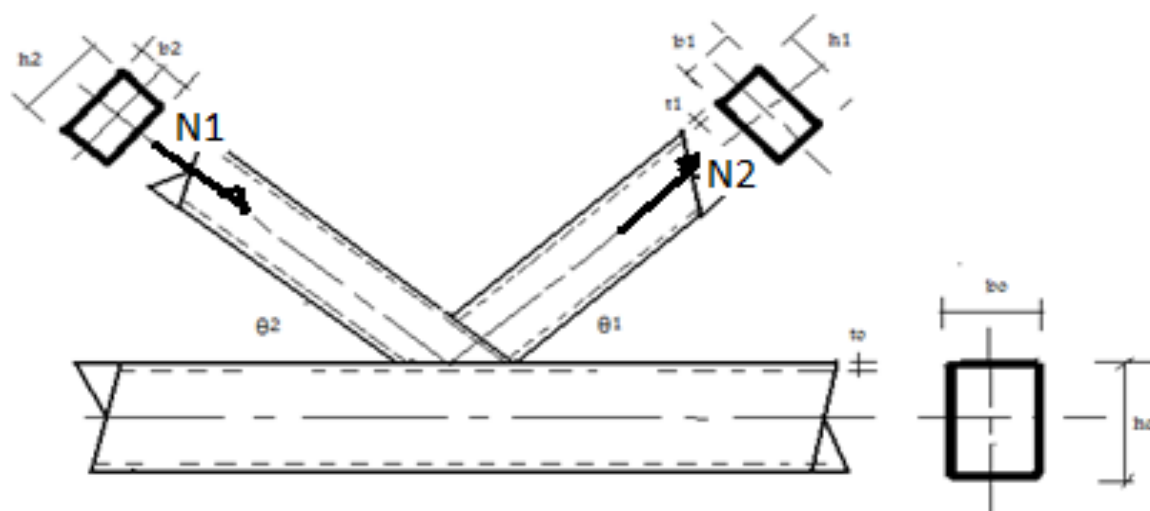


Figure 3 : Caractéristiques géométriques des poutres

Les différents paramètres des joints sont définis et résumés dans le tableau 2.

©UBMA - 2018

Tableau 2 : Différents paramètres des joints

Poutres	Type de joint	θ_1	θ_2	B	b_o/t_o	b_1/t_1	b_2/t_2	b_1/b_2
P1	100% Recouvrement	60.6	60.6	0.9	20	15	15	1.0
P2	100% Recouvrement	65.7	65.7	0.9	20	15	15	1.0
P3	100% Recouvrement	69.4	69.4	0.9	20	15	15	1.0

3.2 Appuis et dispositif de fixation latéral

Un dispositif expérimental a été confectionné au niveau du Laboratoire de Génie Civil (LGC) de l'Université Badji Mokhtar de Annaba pour assurer le bon fonctionnement des essais comme le montre la figure 4. Ce système composé de cornières et de cadres fixés respectivement aux appuis et au milieu sur le portique, a été mis en place pour répondre aux exigences des conditions aux limites que sont principalement les appuis et le montage réalisé.



Figure 4 : système de stabilisation

Ainsi, pour assurer la stabilité de la poutre et pour bien la maintenir un dispositif composé de deux cornières a été utilisé au niveau des appuis. Au milieu, un cadre placé au niveau de la diagonale au lieu de la membrure supérieure a été adopté comme contreventement pour éviter que la déformation de la poutre ne bute sur le cadre. Ce système qui assure la stabilité latérale a pour rôle d'immobiliser les poutres contre tout déplacement latéral. Ce dispositif joue ainsi le rôle de contreventement pour les poutres au niveau des appuis et au milieu.

Les poutres testées reposent sur deux appuis, fixées d'un côté et libres de l'autre. Elles sont soumises à un chargement monotone croissant appliqué au centre de la poutre.

3.3 Instrumentations et mesures

L'instrumentation considérée est l'extensométrie électrique composée de jauges électriques pour mesurer les déformations aux niveaux des joints et des comparateurs mécaniques de type inductifs, placés au milieu des poutres pour mesurer la flèche centrale comme illustré respectivement par les figures 5 et 6).



Figure 5 : jauges extenso métriques



Figure 6 : comparateurs mécaniques de mesure de la flèche

Le relevé de lecture de mesure de la flèche a été fait grâce à un enregistrement vidéo. Deux appareils numériques en position vidéo ont été placés l'un pour la flèche verticale et l'autre pour la flèche latérale. A chaque palier d'intensité 10KN durant l'essai un signal à haute voix indiquant le niveau de charge atteint est donné pour être enregistrée dans la vidéo.

L'acquisition des déformations est réalisée par deux chaînes de mesure, chacune comprenant huit sorties et assistées par ordinateur. Elles fonctionnent en pont complet. Les jauges sont placées sur les quatre faces des éléments constituant le joint afin de mesurer les déformations et de déterminer par la suite les contraintes, les efforts, et les moments dans les diagonales et dans la membrure. Ces jauges sont de marque Kiowa de longueur 10 mm, de résistance électrique $119.8 \pm 0.2 \Omega$, et de facteur de jauge $2.09 \pm 1.0\%$. La figure 7 schématise le positionnement et la numérotation des jauges.

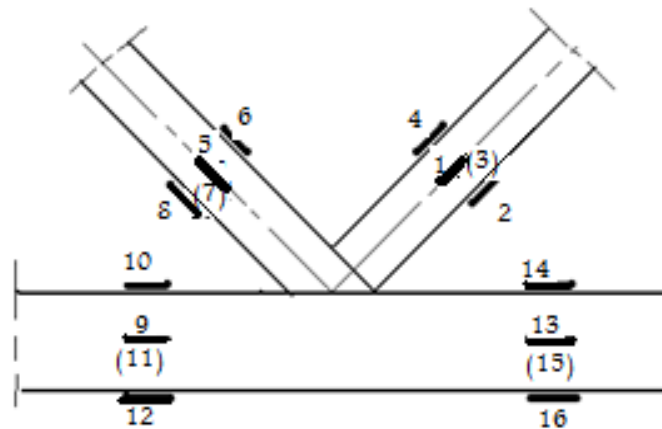


Figure 7 : Positionnement et numérotation des jauges

Après un premier essai préliminaire, il a été constaté une déformation rapide de la face inférieure de la membrure au niveau des appuis et un voilement des parois de la membrure supérieure au niveau du point d'application de la charge. Pour pallier à ces inconvénients et à ces aléas, un renforcement spécial a été additionné et appliqué aux endroits cités au moyen d'un profilé en forme de U reconstitué et soudé comme l'illustrent les figures 8 et 9.



Figure 8 : Renforcement de la poutre au niveau de l'appui



Figure 9 : Renforcement au point d'application de la charge

3.4 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental de chargement est un portique de dalle d'essais de capacité 20 tonnes, pilotée par un banc à commande manuelle permettant de contrôler la charge appliquée. Le système est asservi en force.

4. OBJECTIFS ET METHODOLOGIE

Les objectifs principaux de cette investigation étaient, d'une part d'évaluer le comportement de ce type de poutre, en particulier les joints par une étude expérimentale qui reste une voie majeure permettant de mieux comprendre les phénomènes importants, et d'autre part de valider les résultats ou établir une étude comparative par une analyse numérique en utilisant le logiciel de calcul Abaqus. L'expérimentation est basée d'une part sur l'acquisition des déformations, qui par la suite serviront pour la détermination des efforts, des contraintes et des moments et d'autre part par l'enregistrement des déplacements verticaux et latéraux. Dans chaque poutre deux joints ont été envisagés : un nœud central au point d'application de la charge et un second nœud le plus sollicité dans la membrure inférieure qui se diffère d'une poutre à l'autre.

5. ANALYSE NUMERIQUE

Une analyse numérique utilisant un logiciel de calcul a été menée afin de valider l'étude expérimentale. Les poutres ont été dessinées en 3D puis analysées. Comme il s'agit de sections creuses minces, l'élément coque qui semble être le plus approprié et qui convient bien pour ce type de section a été adopté. Le logiciel de calcul donne la possibilité de choisir le nombre de nœuds de l'élément choisi ou il le fait d'une façon automatique. Cette approche a permis de déterminer directement les valeurs des déformations, des contraintes, des déplacements et des efforts dans n'importe quel point de la structure.

Les figures 10 et 11 montrent une schématisation des maillages entrepris au niveau du joint central au point d'application de la charge et au niveau du joint près de l'appui.

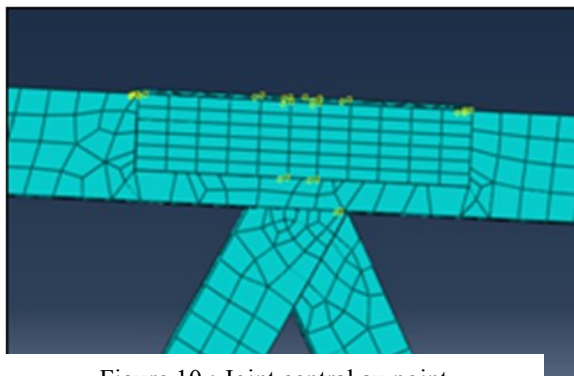


Figure 10 : Joint central au point d'application de la charge

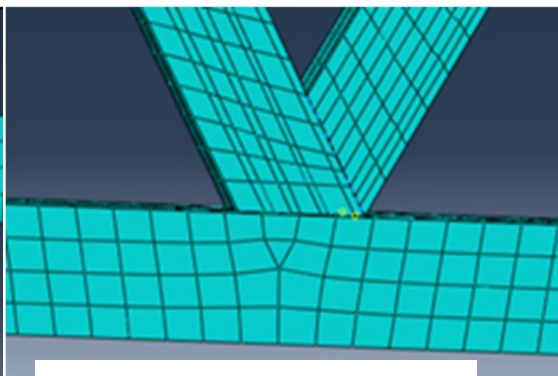


Figure 11 : Joint près de l'appui

Les éléments constituant les joints 1 et 2 sont soudés comme le montrent les illustrations des figures 12 et 13. Bien que la soudure ait un effet sur le comportement des poutres et en particulier aux niveaux des joints en engendrant des contraintes résiduelles, des précautions ont été prises dans la réalisation de l'assemblage des éléments du joint en utilisant des techniques de soudage particulières afin d'éviter l'apparition de déformations importantes et de minimiser l'effet de ces contraintes. Dans l'analyse numérique, il a été introduit les caractéristiques de la soudure.

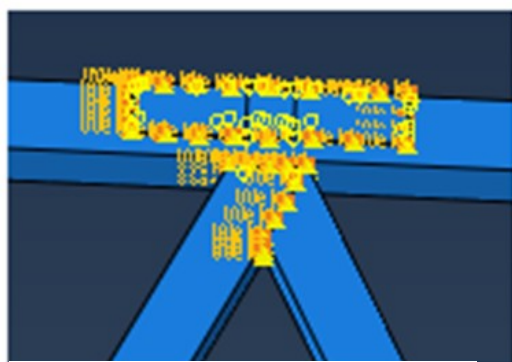


Figure 12: soudure au niveau du joint central

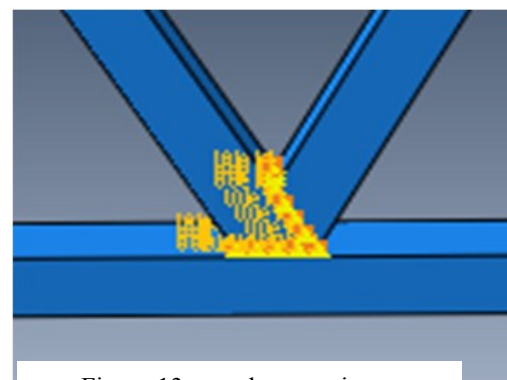


Figure 13 : soudure au niveau du joint près de l'appui

6. ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette étude, l'objectif est d'analyser et d'étudier le comportement du joint central au point d'application de la charge mais surtout d'étudier aussi le comportement du joint près de l'appui. Ce choix est justifié par le fait qu'au niveau de l'appui, l'effort de traction est important pouvant provoquer une rupture de la soudure ou de la diagonale et même aussi des déformations dans la membrure. La force de chargement est appliquée de manière monotone croissante. L'analyse de chaque poutre sera présentée séparément.

6.1 Résultats de la Poutre P1

La figure 14 montre une schématisation respectivement du joint N2 situé au niveau du point d'application de la charge et du joint N1 situé au voisinage de l'appui.

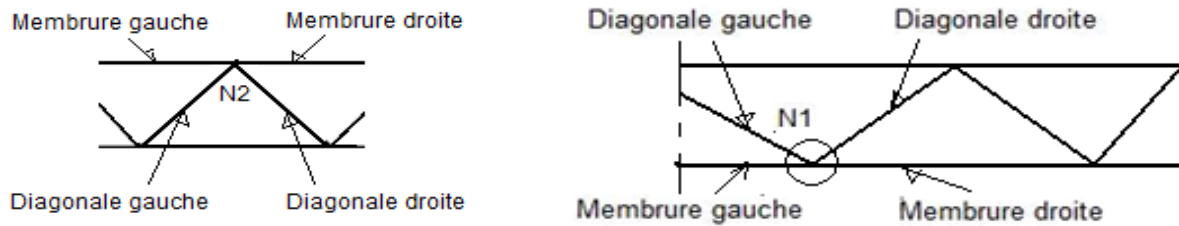


Figure. 14 : Joints au point d'application de la charge N2 et au voisinage de l'appui N1.

La figure 15 montre la variation de la flèche au cours du chargement obtenue expérimentalement et numériquement sur la membrure inférieure.

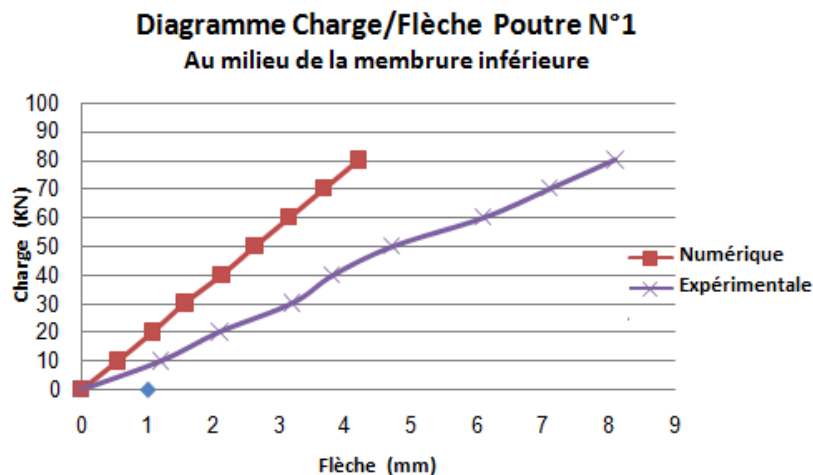


Figure. 15 Variation charge/flèche

Selon les approches numérique et expérimentale la poutre est considérée comme rigide et s'est comportée de façon élastique pour des charges modérées allant jusqu'à 30 KN. La flèche est proportionnelle à la charge et l'allure des tracés des courbes de comportement est linéaire. L'expérimentation reflète ainsi ce comportement.

A partir de l'intensité de la charge égale à 30 KN et jusqu'au chargement de 50 KN, la vitesse de déformation montre une légère diminution ou un ralentissement. Ceci est probablement dû au commencement de la plastification de la membrure au point d'application de la charge comme l'indiquent les illustrations de la figure 15. Ainsi une partie de la charge est absorbée par la plastification de la membrure.

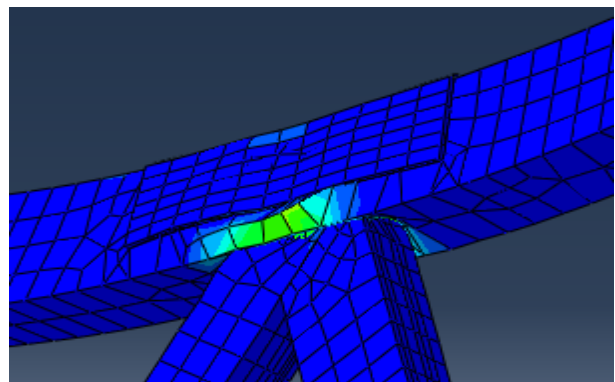


Figure. 16 : Plastification de la membrure supérieure au point d'application de la charge

Au niveau du chargement d'intensité 80 KN, la flèche atteint la valeur de 8 mm. A cette valeur critique du chargement, la membrure supérieure au point d'application de la charge s'est complètement plastifiée. Il y a eu voilement des faces latérales et enfoncement de la face inférieure de la membrure. Par ailleurs, cette plastification qui s'est produite au niveau du joint central a influé sur la répartition de la charge, provoquant ainsi un déversement latéral de la poutre. Ce mode de ruine est le plus courant pour les assemblages des membrures à parois minces. Par ailleurs, ce mode a été constaté aussi bien à travers l'étude expérimentale que celle numérique qui a abouti aux mêmes allures de déformations aux niveaux des parois et de la partie inférieure de la membrure (Fig. 16).

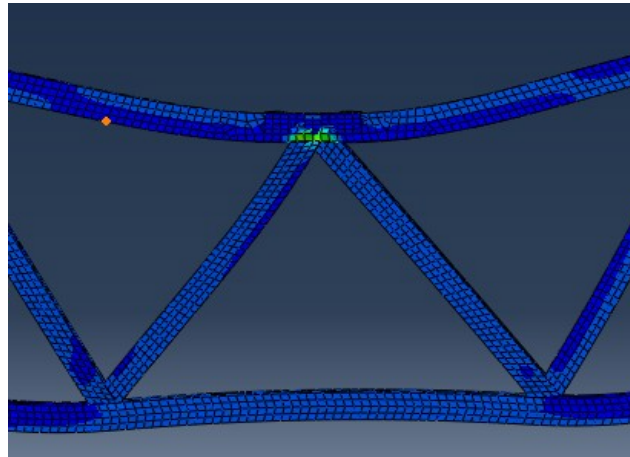


Figure. 17 : Déformation de la poutre

Les valeurs de la flèche obtenues par l'analyse expérimentale sont nettement supérieures à celles obtenues par l'analyse numérique. Cela est dû à de nombreux paramètres nécessitant des analyses plus poussées pour les identifier. On peut cependant citer entre autres la rectitude, les pertes des propriétés de l'acier, la dégradation progressive de la soudure ...

En comparaison avec les tests effectués sur des poutres de 100x100x4 mm et de 100x100x5 mm par Eastwood et Wood [1] durant lesquels la flèche maximale a été enregistré au milieu, Il en est de même pour la présente étude réalisée sur des poutres de sections creuses rectangulaires minces de 70x50x2.5 mm.

L'analyse numérique réalisée grâce à l'utilisation d'Abaqus et selon la déformé de la poutre (Fig.17) semble indiquer que les valeurs maximales se localisent aux niveaux des nœuds gauche et droit du tronçon central. Ce constat reste à vérifier dans d'autres études expérimentales.

- Nœud près de l'appui (N1)

Les barres constituant le nœud 1 situé près de l'appui (Fig.18) montrent un comportement élastique et sont bien loin de la valeur limite de leur résistance.

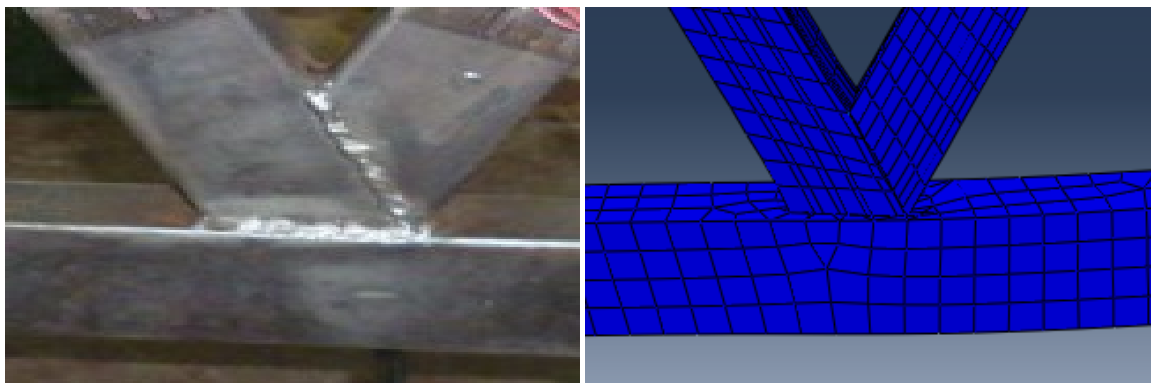


Figure. 18 Comportement élastique des éléments du nœud N1 près de l'appui

La linéarité des graphes des figures 19 et 20 représente respectivement la variation de l'effort axial en fonction de la charge dans les diagonales du joint N1, obtenue par l'expérimentation et par l'analyse numérique. Ainsi, on s'aperçoit que la variation de la déformation en fonction de la contrainte dans les diagonales tendue et comprimée du nœud 1 reflète aussi le comportement élastique des éléments du joint.

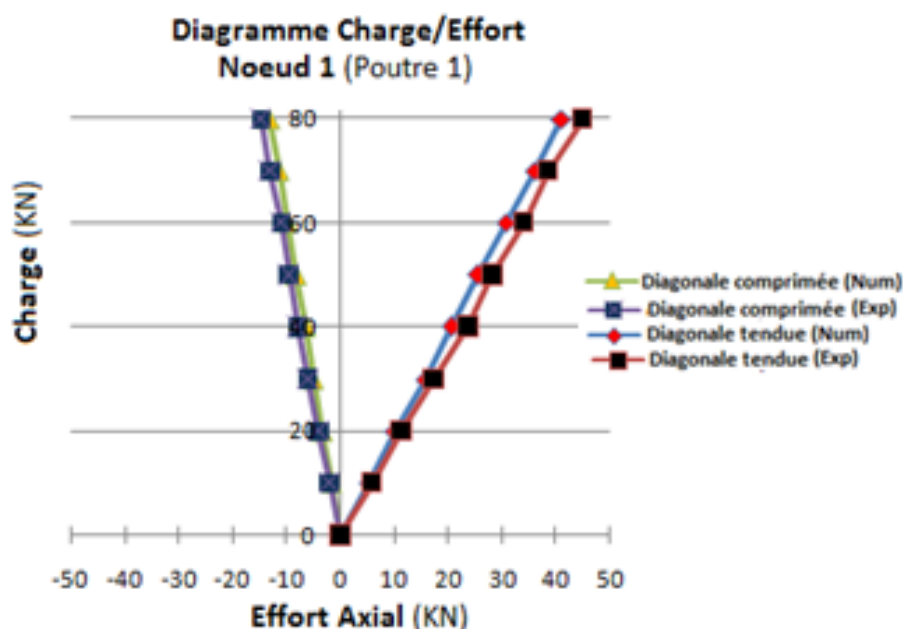


Figure. 19 : Variation charge/ effort dans les diagonales du joint N1

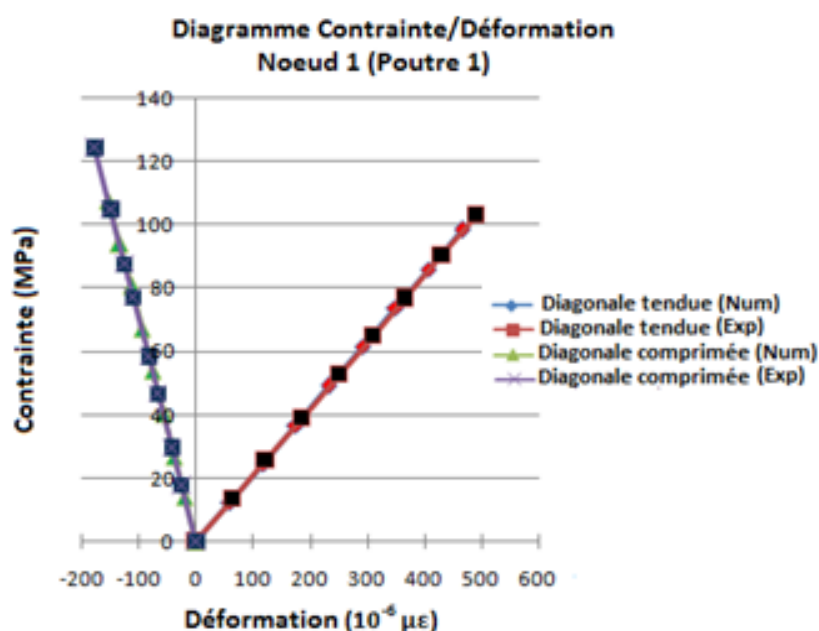


Figure 20 : Variation contrainte/déformation dans les diagonales du joint N1

Le tableau 3 rassemble les valeurs des contraintes et celles des déformations dans les diagonales tendues et comprimées déduites de l'expérimentation et de l'analyse numérique, ainsi que les pourcentages d'erreurs entre les deux approches pour chaque niveau atteint par le chargement. Pour les barres tendues le pourcentage d'erreur est en moyenne de 5%, et pour les barres comprimées il atteint 12%.

Tableau 3 Contraintes et déformations dans les diagonales du nœud 1 de la poutre P1

Charge KN	σ_{exp} dans les diagonales MPa		σ dans les diagonales MPa		$(\sigma - \sigma_{exp})/\sigma_{exp} \cdot 100$		ϵ_{exp} dans les diagonales $10^{-6} \mu\epsilon$		ϵ dans les diagonales $10^{-6} \mu\epsilon$		$(\epsilon - \epsilon_{exp})/\epsilon_{exp} \cdot 100$	
	tendue	Comprimée	tendue	Comprimée	Tendue	Comprimée	tendue	Comprimée	tendue	Comprimée	tendue	comprimée
10	13,335	17,71	12,442	14,069	7,17%	25,8%	63,5	-25,3	59,4	-20,4	6,9%	24,0%
20	25,515	29,652	24,61	26,891	3,6%	10,2%	121,5	-42,36	116,4	-38,4	4,3%	10,3%
30	38,944	46,613	36,915	40,336	5,4%	15,5%	185,45	-66,59	174,67	-57,6	6,1%	15,6%
40	52,804	58,45	49,22	53,782	7,28%	8,6%	251,45	-83,5	232,87	-76,7	7,9%	8,8%
50	65,1	77	61,525	67,227	5,8%	14,5%	310,5	-110,2	291,08	-95,9	6,6%	14,9%
60	76,828	87,745	73,831	80,831	4,0%	8,5%	365,85	-125,35	349,3	-114	4,7%	9,9%
70	90,426	105	86,14	94,123	4,9%	11,5%	430,6	-150	407,54	-134	5,6%	11,9%
80	103,017	124,45	98,445	107,569	4,6%	15,7%	490,56	-177,79	465,76	-153	5,3%	16,2%

Les illustrations des figures 21 et 22 donnent un aperçu de la simulation numérique du mode de déformation du joint 1 situé près de l'appui.

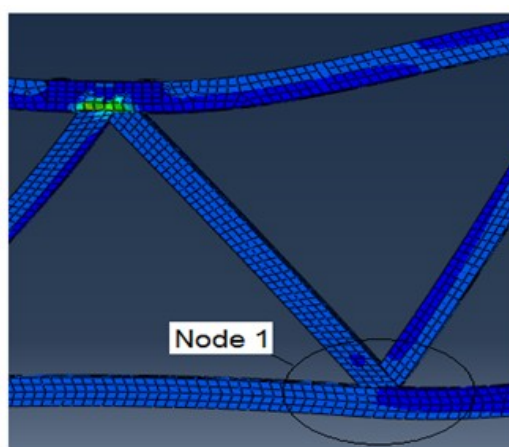


Figure. 21 : Déformation du joint 1

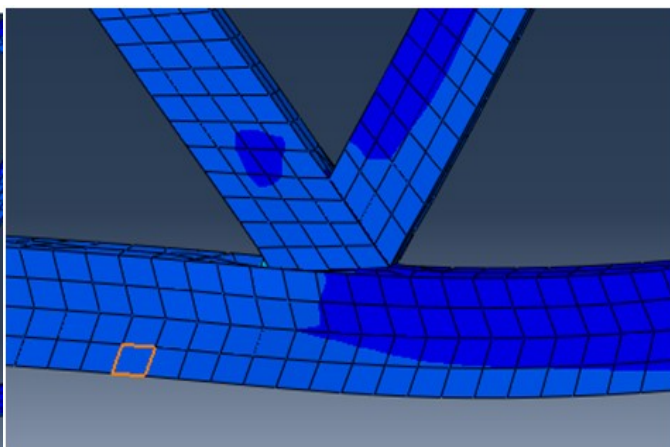


Figure. 22 : Détail du joint 1

- Noeud central (N2)

La figure 23 illustre la courbe contrainte-déformation ou loi de comportement des diagonales comprimées droite et gauche du joint N2.

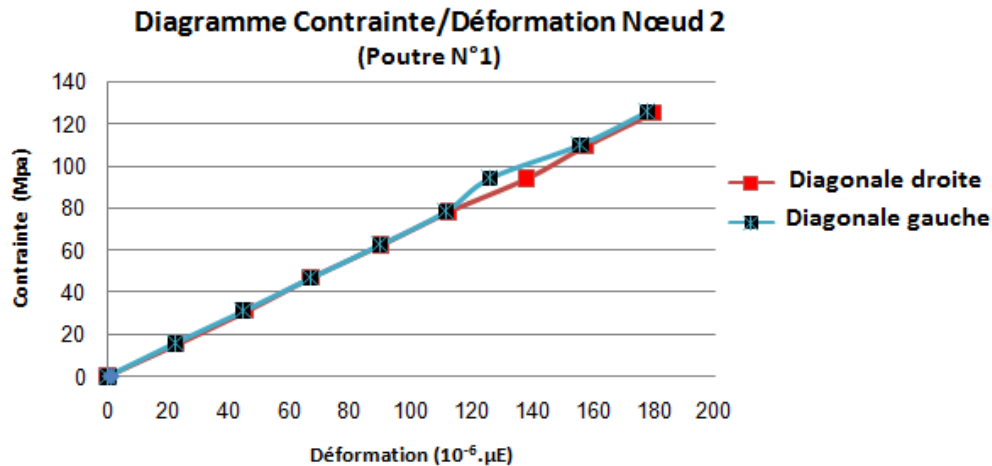


Figure.23 : Variation contrainte/déformation dans les diagonales comprimées droite et gauche du joint N2

La linéarité des points expérimentaux traduit le comportement élastique des diagonales qui ne montrent aucun signe de plastification.

Sur la base de l'ensemble des résultats obtenus, un constat indique que la quasi linéarité des graphes des lois de comportement décrit parfaitement le comportement élastique des joints à l'exception du joint central au point d'application de la charge comme illustré par l'analyse numérique et expérimental dans la figure 20. Les valeurs maximales des contraintes sont bien loin de leurs valeurs élastiques.

En effet, l'essai expérimental fait constater que les membrures constituant le nœud 2, comparativement à celles du nœud 1, ont subi de grandes déformations allant jusqu'à la plastification complète. Cette variation est caractérisée par, une première phase quasi linéaire durant laquelle il est couramment admis que la sollicitation n'a entraîné que des valeurs faibles de contraintes et de déformations. La deuxième phase est caractérisée par une non linéarité correspondant au comportement plastique des éléments constituant le nœud. Cette plastification a débuté à partir d'un chargement d'environ de 30KN, passant par un palier, avant d'enregistrer un accroissement des contraintes et des déformations dans les éléments constituant le nœud. Une troisième phase voit son origine au pic de charge qui correspond à la plastification complète de la membrure, donnant des valeurs de contrainte d'environ 200 MPa au voisinage du nœud.

6.2 Résultats de la Poutre P2

La figure 24 montre une schématisation respectivement du joint N2 situé au niveau du point d'application de la charge et du joint N1 situé au voisinage de l'appui.

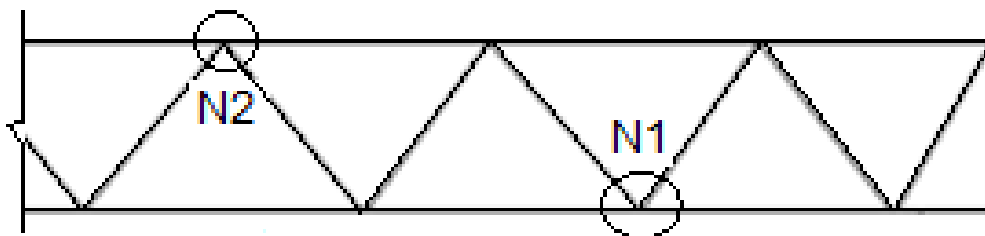


Figure. 24: Joints respectivement au point d'application de la charge N2 et au voisinage de l'appui N1.

- Nœud près de l'appui (N1)

Les figures 25 et 26 représentent respectivement l'effort axial en fonction de la charge appliquée et les courbes contrainte-déformation dans les diagonales tendue et comprimée du joint 1 de la poutre 2.

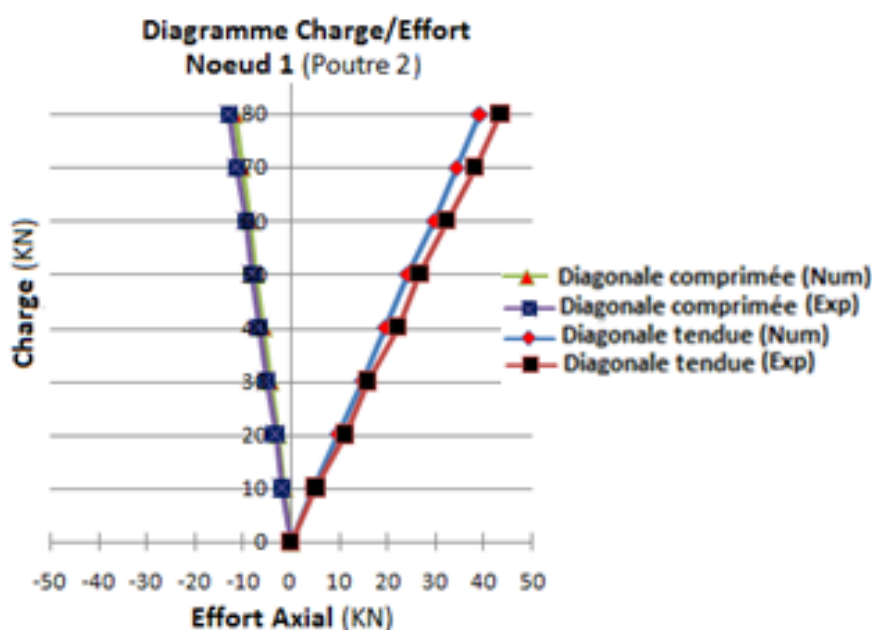


Figure. 25 : Variation contrainte/déformation dans les diagonales du joint N1

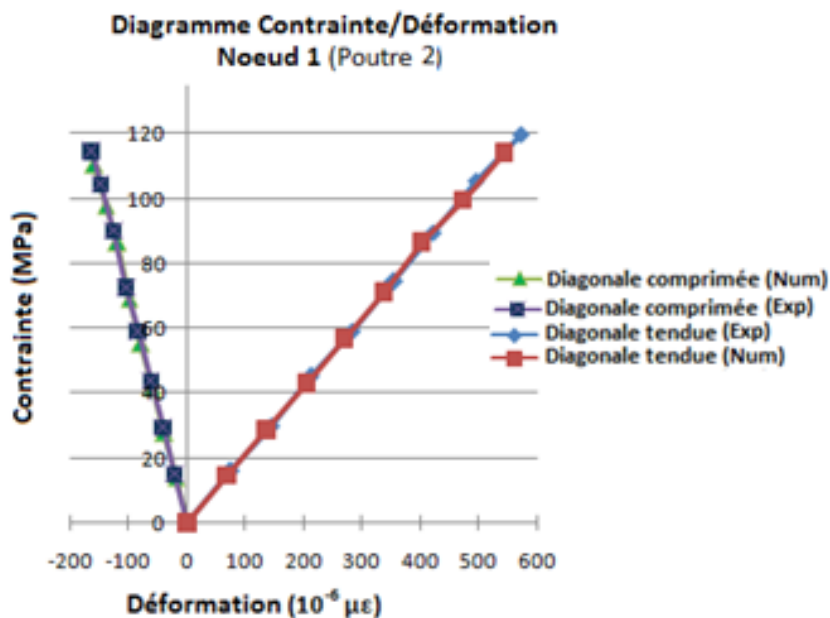


Figure. 26 : Variation Contrainte/Déformation dans les diagonales du joint N1

Les mêmes constations que celles relevées sur la poutre 1 et ses éléments peuvent être formulées pour le cas de la poutre 2.

Le tableau 6 rassemble les valeurs mesurées et calculées des contraintes et des déformations dans les diagonales du nœud 1 de la poutre 2 pour les différents niveaux de chargement.

Tableau 4 : Contraintes et déformations dans les diagonales du nœud 1 de la poutre P2

Charge KN	σ_{exp} dans les diagonales MPa		σ dans les diagonales MPa		$(\sigma - \sigma_{exp})/\sigma_{exp} \cdot 100$		ϵ_{exp} dans les diagonales $10^{-6} \mu\epsilon$		ϵ dans les diagonales $10^{-6} \mu\epsilon$		$(\epsilon - \epsilon_{exp})/\epsilon_{exp} \cdot 100$	
	tendue	Comprimée	tendue	Comprimée	Tendue	Comprimée	tendue	Comprimée	tendue	Comprimée	tendue	comprimée
10	15,92	15,01	14,4	13,819	9,54%	7,93%	74,5	21,5	68,4	19,9	8,18%	7,44%
20	30,01	29,35	28,64	27,595	4,56%	5,97%	142,6	42,01	136,2	39,9	4,48%	5,02%
30	45,05	43,58	42,96	41,46	4,63%	4,86%	212	62,8	204	59,8	3,77%	4,77%
40	59,35	58,95	56,81	55,191	4,27%	6,37%	282	85,2	270,2	79,8	4,18%	6,33%
50	74,45	72,56	71,09	69,1	4,51%	4,76%	354,6	105	338	99,8	4,68%	4,95%
60	89,62	90,08	86,43	86,43	3,55%	4,05%	420,8	126,5	403	120,2	4,23%	4,98%
70	105,5	104,25	99,53	97,814	5,65%	6,17%	495,3	148,7	473,5	140,2	4,40%	5,71%
80	120,02	114,63	114,04	110,414	4,98%	3,67%	570,9	165,6	543	160	4,88%	3,38%

Il a été enregistré un pourcentage d'erreur entre les deux approches (expérimentale et numérique) qui varie de 5% à 6%.

- Nœud (N2)

La figure 27 illustre la variation de la courbe contrainte-déformation dans les diagonales comprimées droite et gauche du joint N2.

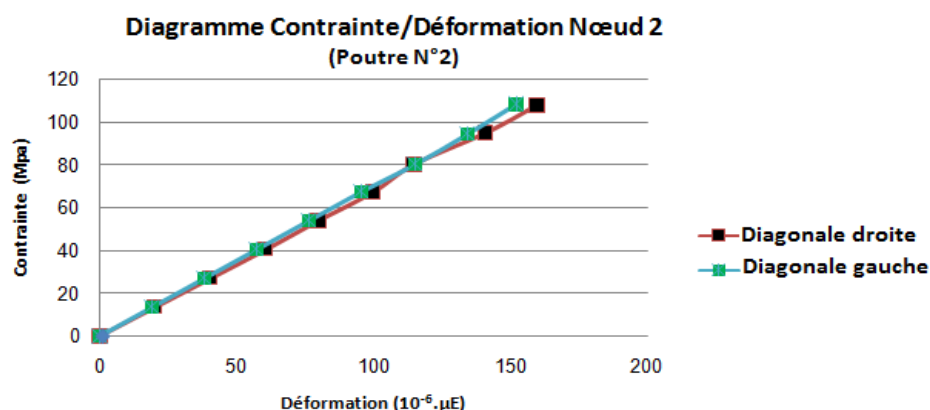


Figure 27 : Variation Contrainte/Déformation dans les diagonales du joint N2
Comme il apparaît les points expérimentaux sont disposés de façon linéaire traduisant le comportement élastique du nœud.

6.3 Résultats de la Poutre P3

La figure 28 illustre pour le cas de la poutre 3 une schématisation des nœuds N1 et N2.

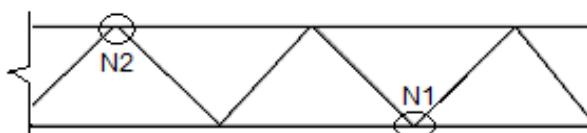


Figure 28 : Joints au point d'application de la charge N2 et au voisinage de l'appui N1.

- Nœud N1

Les figures 29 et 30 montrent le diagramme charge – effort axial et le diagramme contrainte-déformation dans les diagonales tendue et comprimée du joint N1 de la poutre 3.

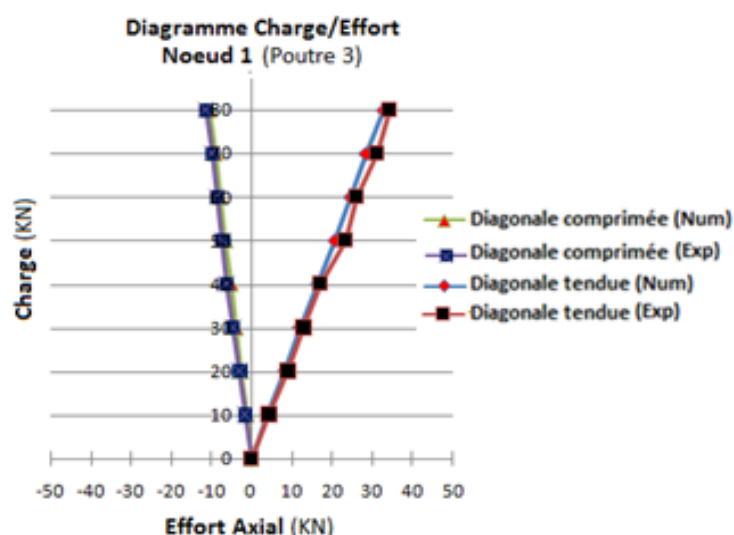


Figure 29 : Variation Charge / Effort dans les diagonales du joint N1

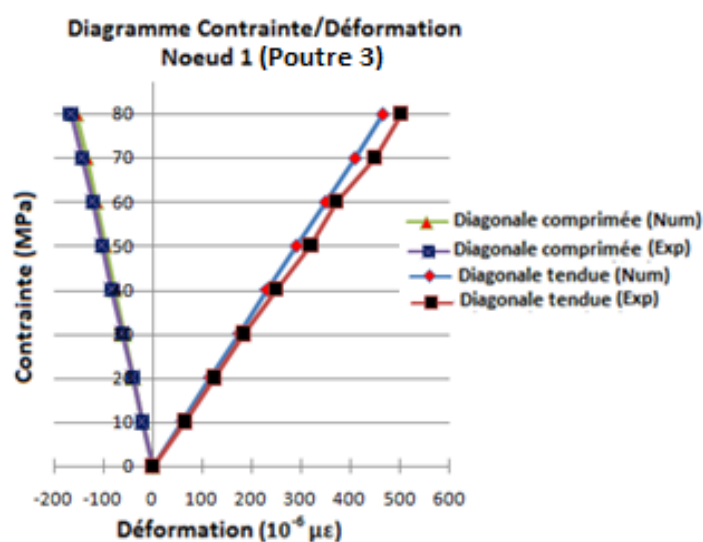


Figure 30 : Variation Contrainte/Déformation dans les diagonales du joint N1

Ces diagrammes sont linéaires confirmant les résultats enregistrés sur les deux poutres P1 et P2. Le tableau 5 rassemble les valeurs calculées et mesurées des contraintes et des déformations ainsi que les écarts déduits de l'expérimentation et l'analyse numérique dans les diagonales du nœud N1 de la poutre 3.

Tableau 5 Contraintes et déformations dans les diagonales du nœud 1 de la poutre P3

Charge KN	σ_{exp} dans les diagonales MPa		σ dans les diagonales MPa		$(\sigma - \sigma_{exp}) / \sigma_{exp} \cdot 100$		ϵ_{exp} dans les diagonales $10^{-6} \mu\epsilon$		ϵ dans les diagonales $10^{-6} \mu\epsilon$		$(\epsilon - \epsilon_{exp}) / \epsilon_{exp} \cdot 100$	
	tendue	Comprimée	tendue	Comprimée	Tendue	Comprimée	tendue	Comprimée	tendue	Comprimée	tendue	comprimée
10	13,56	15,9	12,44	14,06	8,26%	11,57%	65,2	21,5	59,4	20,4	8,90%	5,12%
20	26,2	29	24,61	26,89	6,07%	7,28%	125,5	40,5	116	38,4	7,57%	5,19%
30	39	43,2	36,91	40,33	5,36%	6,64%	185,3	62	175	57,6	5,56%	7,10%
40	53,26	56,5	49,22	53,78	7,59%	4,81%	250,1	82,6	233	76,7	6,84%	7,14%
50	64,9	71,03	61,52	67,22	5,21%	5,36%	320	102,4	291	95,9	9,06%	6,35%
60	76,05	84,1	73,83	80,83	2,92%	3,89%	370,8	122	349	114	5,88%	6,56%
70	90,2	97,7	86,14	94,12	4,50%	3,66%	450	143,4	408	134	9,33%	6,56%
80	104,5	111,6	98,44	107,56	5,80%	3,62%	502	166	466	154	7,17%	7,23%

- Nœud N2

La variation contrainte/déformation dans les diagonales comprimées droite et gauche du nœud 2 est exprimée sur la figure 32 à l'allure linéaire.

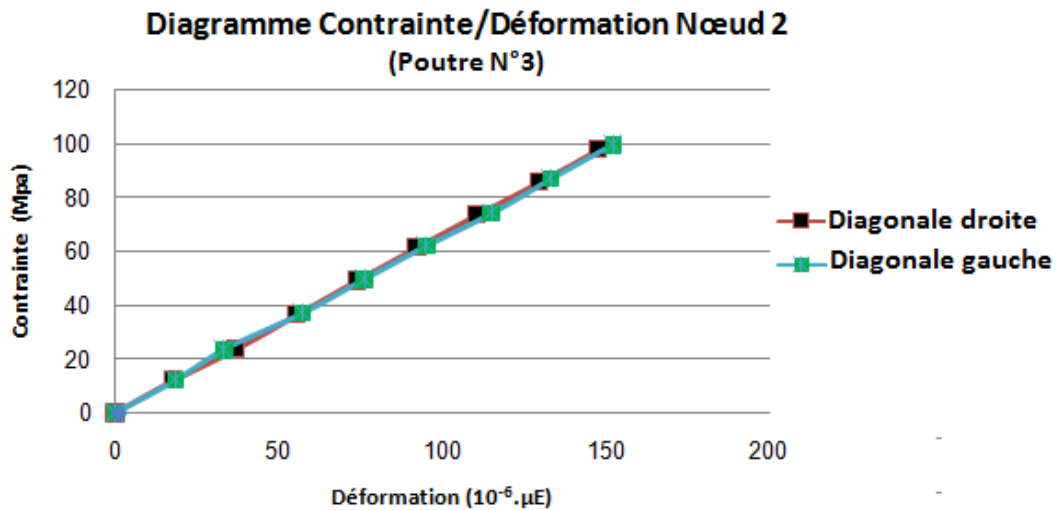


Figure 31. Variation Contrainte/Déformation dans les diagonales du joint N2

6.4 Constat

Compte tenu des niveaux de contraintes atteints dans les trois poutres, les diagrammes charge/effort et contrainte/déformation dans les diagonales des différents types de poutre se sont caractérisés par des courbes linéaires. Ce comportement élastique est similaire n'induit pas de déformations apparentes irréversibles dans ces éléments. Bien que nous n'ayons étalé de façon relativement approfondie notre étude que sur un paramètre, celui de l'angle de la diagonale avec la membrure, l'analyse des résultats prometteurs a permis de mettre en évidence son influence. Pour analyser plus finement et plus rigoureusement cette influence, les valeurs des contraintes enregistrées dans les diagonales du nœud 2 dans les trois poutres reflètent l'effet de l'angle θ , donnant des contraintes variant de 100 à 120 MPa. Selon la loi de Hooke, les valeurs des déformations dans les diagonales ainsi que dans la membrure du nœud 1 étaient bien loin de leurs valeurs limites.

6.5 Détermination des efforts et des moments dans les barres

En utilisant les notations de la figure 32, la force axiale et les moments de flexion dans l'élément i peuvent être écrits comme suit :

$$\text{Force axiale } N_i = \sum_{i=1}^{n=4} \varepsilon_i * E.A = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4)}{4} * E.A \quad (1)$$

$$\text{Moment de flexion } M_{2-4}^i = \frac{E.Z}{2} \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_4) \quad (2)$$

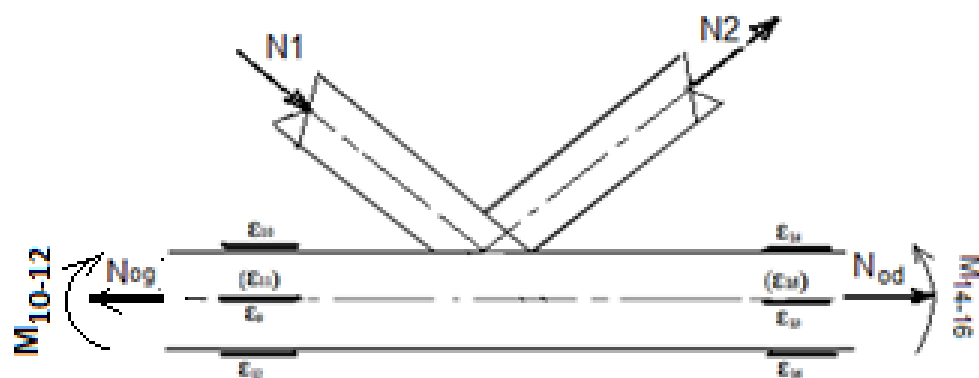


Figure 32 : Notations pour les moments et efforts axiaux

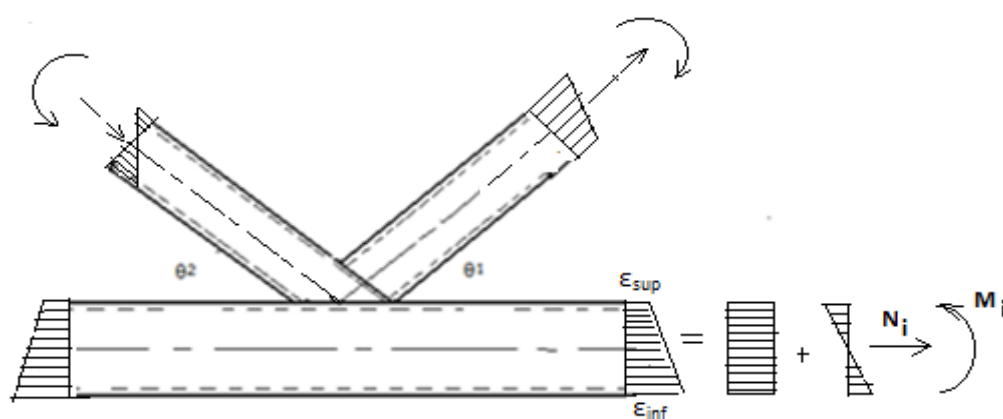


Figure 33 : Distribution des contraintes dans les éléments du nœud

Les tableaux 6 et 7 rassemblent respectivement les moments M_{10-12} et M_{14-16} dans la membrure et les pourcentages d'erreur entre les deux approches P_{10-12} et P_{14-16} ainsi que l'effort axial dans les diagonales et dans la membrure inférieure déduits du calcul numérique et des essais du nœud 1 de la poutre P1.

Tableau 6 : Moment dans la membrure du noeud1(Poutre1)

Charge (KN)			Moment (N.m)			
Numérique	Expérimentale		Pourcentage d'erreur $(X_n - X_e) \cdot 100 / X_e$			
M_{14-16}	M_{10-12}	M_{14-16}	M_{10-12}	P_{14-16}	P_{10-12}	
10	4.01	-20.2	6.20	-22.30	-35.3%	-9.4%
20	8.17	-40.4	10.10	-46.20	-19.1%	-12.5%
30	11.90	-60.6	16.32	-70.10	-27.0%	-13.5%
40	16.30	-80.9	22.50	-91.30	-27.5%	-11.4%
50	20.00	-101.0	28.30	-118.90	-29.3%	-15.0%
60	24.50	-121.0	32.60	-128.30	-24.8%	-5.6%
70	28.20	-140.0	36.80	-152.50	-23.3%	-8.1%
80	32.10	-162.0	40.36	-172.60	-20.4%	-6.1%

P_{14-16} et P_{10-12} : Pourcentage d'erreur entre numérique et expérimentale

Tableau 7 : Effort axial dans les barres du noeud1 (Poutre P1)

		Charge (KN) Diagonales					Effort axial (KN) Membrure inférieure				
Numérique		Expérimentale		Pourcentage		Numérique		Expérimentale		Pourcentage d'erreur d'erreur	
N ₁		N ₂	N _{1exp}	N _{2exp}	P _{1d}	P _{2d}	N _{od}	N _{og}	N _{odexp}	N _{ogexp}	P _{od} P _{og}
10	-1.64	5.12	-2.14	5.96	23.3%	-14.0%	5.6	-11.4	6.40	-12.47	-12.5% -8.5%
20	-3.28	10.20	-4.02	11.25	18.4%	-7.3%	11.1	-22.7	14.32	-24.62	-22.4% -7.7%
30	-4.92	15.52	-5.98	17.36	-17.7%	-10.5%	16.8	-34.1	19.84	-39.58	-15.3% -13.8%
40	-6.56	20.50	-8.05	23.70	-18.0%	-13.5%	22.5	-45.5	28.10	-50.46	-19.9% -9.8%
50	-8.20	25.60	-9.60	28.21	-14.5%	-9.2%	28.1	-56.9	35.87	-60.59	-21.6% -6.0%
60	-9.84	30.70	-10.95	33.89	-10.1%	-9.4%	33.7	-68.2	39.90	-74.50	-15.5% -8.4%
70	-11.50	35.90	-13.06	38.45	-11.9%	-6.6%	39.3	-79.6	45.87	-85.98	-14.3% -7.4%
80	-13.10	41.00	-14.80	44.80	-11.4%	-8.4%	44.4	-91.1	51.65	-97.10	-14.0% -6.1%

P_{1d}, P_{2d}, P_{od} et P_{og}: Pourcentage d'erreur entre numérique et expérimentale = $(X_n - X_e) \cdot 100 / X_e$

M₁₀₋₁₂ et N_g: Moment et effort dans la membrure gauche du nœud

M₁₄₋₁₆ et N_d Moment et effort dans la membrure droite du nœud

Les tableaux 8, et 9 rassemblent les résultats calculés et expérimentaux des moments et des efforts axiaux dans le nœud 1 de la membrure des poutres P2 et P3.

Tableau 8 : Moment et effort axial dans la membrure du noeud1 (Poutre P2)

Charge (KN)		Moment (N.m)				Effort axial (KN)		
Numérique		Expérimentale		Numérique		Expérimentale		
	M ₁₄₋₁₆	M ₁₀₋₁₂	M ₁₄₋₁₆	M ₁₀₋₁₂	N _d	N _g	N _{d(exp)}	
Ng(exp)								
10	23.8	-19.7	25.40	-21.55	3.55	-7.56	4.25	-
8.20								
20	47.6	-39.5	52.60	-42.68	7.02	-15.01	7.80	-
17.22								
30	77.2	-59.2	80.35	-64.55	10.60	-22.70	12.58	-
25.36								
40	102.9	-78.7	126.55	-95.85	14.20	-30.20	18.20	-
34.29								
50	124.2	-107.0	135.66	-118.80	17.70	-37.40	21.65	-
41.78								
60	149.1	-128.0	158.90	-132.55	21.30	-44.90	26.70	-
50.14								
70	173.9	-138.1	190.36	-159.55	24.60	-52.90	29.35	-

56.95								
80	198.8	-171.0	219.35	-181.66	28.40	-59.90	32.50	-
65.34								

N_d : Effort dans la diagonale droite du joint 2

N_g : Effort dans la diagonale gauche du joint 2

Tableau 9 : Moment et effort axial dans la membrure du noeud1 (Poutre P3)

	Charge (KN)		Moment (N.m)		Effort axial (KN)			
			Numérique		Expérimentale		Numérique	Expérimentale
	M_{14-16}	M_{10-12}	M_{14-16}	M_{10-12}	N_d	N_g	$N_{d(exp)}$	
$N_g(exp)$								
10	20.8	-13.0	22.35	-15.17	1.68	-4.78	2.80	-
5.50								
20	43.1	-26.1	72.55	-30.58	3.42	-9.55	5.45	-
11.65								
30	64.6	-31.9	135.45	-39.45	5.13	-14.37	8.20	-
18.80								
40	89.1	-52.1	233.15	-61.80	6.83	-19.15	10.25	-
25.54								
50	111.2	-65.2	342.25	-76.55	8.72	-23.90	13.15	-
29.35								
60	134.5	-77.9	491.45	-86.66	10.45	-28.70	16.23	-
35.68								
70	148.0	-91.3	636.78	-110.15	11.95	-33.47	18.20	-
38.64								
80	171.0	-104.0	823.84	-120.25	13.67	-38.25	20.16	-
44.35								

6.6 Modèles analytiques de description du mode de ruine

Différents modèles analytiques pour décrire le mode de ruine de ce type d'assemblages sont proposés dans la littérature scientifique et technique. Les paramètres mécanique et géométrique des trois modèles choisis pour une comparaison sont illustrés par la figure 3 et permettent de calculer les efforts N_1 et N_2 dans les diagonales

Le tableau 10 identifie les trois modèles choisis pour la comparaison, les équations de quantification de la capacité du nœud et les valeurs calculées pour chaque poutre.

Tableau 10 : Modèles analytiques

Modèles Analytiques		Capacité du nœud (KN)			Poutres
		P1	P2	P3	
Modèle de charnière plastique	$N_1 = \frac{f_{y0} \cdot t_0^2}{(1-\beta)} \left(\frac{2\eta}{\sin \theta_1} + 4\sqrt{1-\beta} \right) \frac{1}{\sin \theta_1}$		43.2	39.8	48.6
Modèle basé sur la largeur efficace de la diagonale	$N_1 = f_{y1} \cdot t_1 (2h_1 - 4t_1 + b_1 + b_{e(ov)})$ $b_{e(ov)} = \frac{10}{b_j/t_j} \cdot \frac{f_{yj}}{f_{yi}} \cdot \frac{t_j}{t_i} \cdot b_i$			76.14	
Capacité de la paroi de la membrure ou modèle de voilement	$No = 2 \cdot f_{y0} \cdot t_0 \left(\frac{h_1}{\sin \theta_1} + 5t_0 \right) \cdot \frac{1}{\sin \theta_1}$		110.02	101.27	97.30

Le modèle de charnière plastique donne la valeur la plus faible et s'avère ainsi le modèle le plus approprié pour ce type de poutres, et plus particulièrement pour la poutre 2 à géométrie composée de 11 nœuds avec une capacité de 39.8 KN. Le mode de ruine dépend du type de joint, des conditions de chargement et de divers paramètres géométriques.

6.7 Déversement latéral

La plastification qui s'est produite au niveau du joint central a influé sur la répartition totale de la charge, provoquant ainsi un petit déversement latéral de la poutre. Un déplacement latéral de 2 mm environ est enregistré (Fig. 34). Ce déplacement est cependant considéré comme faible et n'influe pas sur le comportement global de la poutre.



Figure.34 : Enregistrement du déplacement latéral

6.8 Etude comparative entre les poutres

Un des intérêts majeurs de cette étude était de prospecter, d'une part le comportement des joints ainsi que les sollicitations des éléments constituant ces derniers et d'autre part d'analyser l'influence de la géométrie des poutres sur la flèche centrale. En prenant avantage de la symétrie offerte par les trois poutres, les résultats des contraintes et des flèches mettent en évidence le rôle appréciable joué par l'angle θ (angle de la diagonale avec la membrure). Comme le démontrent les figures 35 et 36, où il a été relevé pour des chargements supérieurs à 60 KN un écart dans les valeurs des contraintes entre les différentes poutres allant de 20 à 26%. Par ailleurs, il a été enregistré pour des chargements inférieurs ou égaux à 40 KN des valeurs de contrainte et de flèche qui sont très proches. De ce fait, il apparaît clairement que pour le cas des charges $\leq$ à 40 KN le choix de la poutre 1 est le plus approprié du point de vue résistance et coût.

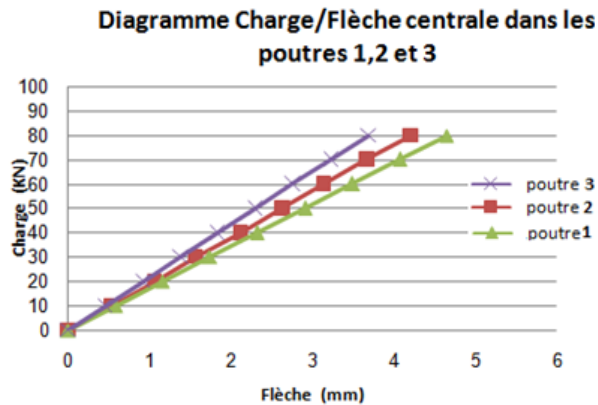


Figure. 35 : Diagramme Charge/flèche des poutres

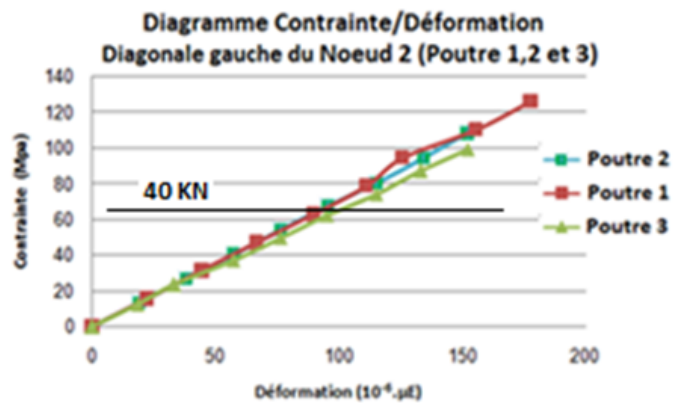


Figure.36 : Diagramme Contrainte/Déformation dans la diagonale du N2

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail est une contribution se présentant comme une alternative aux moyens d'études classiques des poutres en treillis métalliques à sections creuses. Les méthodes purement expérimentales sont souvent très coûteuses lorsque les poutres sont testées à l'échelle réelle, ce qui nécessite des équipements particuliers. D'autre part ces expérimentations qui peuvent se révéler des indicateurs, fournissent souvent des résultats plus qualitatifs que quantitatifs. Il semble qu'une étude paramétrique est nécessaire mais elle peut multiplier le coût et le temps nécessaire à sa réalisation. Selon la littérature scientifique et technique, l'expérimentation avec toutes ses difficultés et ses complexités à appréhender et à relever et la modélisation avec toute sa rigueur que lui impose toute formulation forment en réalité une dualité difficilement séparable.

En conclusion, l'analyse des résultats prometteurs a permis de mettre en évidence que les poutres de sections creuses rectangulaires minces présentent un comportement un peu différent par rapport aux poutres avec des épaisseurs plus au moins épaisses des membrures allant de 4 à 5 mm. Au-delà de ce mode de comportement et de fonctionnement analysé finement pour l'ensemble des trois corps d'épreuves, l'influence de la variation de l'angle entre la diagonale et la membrure a été évaluée.

Compte tenu de la minceur de la section des membrures, un renforcement par un profilé en U du nœud au point d'application de la charge s'avère nécessaire mais qui malheureusement n'a pas pu empêcher la plastification de la membrure en ce point.

L'analyse des résultats a également montré que la géométrie de la poutre influe sur le comportement structurel et plus précisément sur la flèche centrale.

Les deux approches ont apporté des réponses et des interrogations sur l'utilisation des sections rectangulaires creuses minces. Elles ont également montré que l'inconvénient majeur se situe au nœud où la charge est appliquée.

Les résultats obtenus clarifient d'avantage la nature du comportement de l'ensemble des diagonales dans les différentes poutres.

Le modèle de charnière plastique s'est avéré le modèle le plus approprié pour ce type de poutre.

La membrure inférieure s'est comportée d'une façon stable vis-à-vis du déversement latéral. Un déplacement latéral d'environ 2 mm est enregistré.

Les deux approches expérimentale et numérique convergent avec un pourcentage d'erreur d'environ 5% pour les diagonales tendues et de 12% pour celles comprimées.

A la lumière des constats observés et en examinant notamment la flèche et les lois de comportement des différentes poutres, il a été possible d'optimiser et d'établir de façon relative en fonction du chargement, la géométrie de la poutre la plus appropriée du point de vue résistance et coût.

Comme perspectives qui pourraient apporter des réponses aux différentes interrogations soulevées dans ce travail expérimental éclairé pour optimiser l'utilisation des sections creuses à parois minces, il est souhaitable d'envelopper complètement le nœud sous chargement et de répartir la charge aux nœuds.

REFERENCES

- [1] Eastwood W., Wood A. A., "Welded joints in tubular structures involving rectangular hollow sections," Proc., Joints in Structures, Sheffield, England, 1970.
- [2] Eastwood W., Wood A. A., "Recent research on joints in tubular structures," Proc., Canadian Structural Engineering Conference, Toronto, Canada, 1970b.
- [3] Wardenier J., Stark J.W.B., "The static strength of welded lattice girder joints in structural hollow sections. Parts 1-10. CIDECT Final Report 5Q/78/4. Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 1978.
- [4] Strength of Welded T-Joint Truss Connections between Equal Width Cold-Formed RHS. Research Report No R831, 2003.
- [5] Packer J.A., Wardenier J., Kurobane Y., Dutta D., Yeomans N., Hendersen J.E., "Design Guide for Rectangular Hollow Sections (RHS) Joints under predominantly static loading, Ed. by CIDECT, Verlag TÜV Rheinland, Cologne, 1992.
- [6] Philastides A., "Fully overlapped rolled hollow section welded joints in trusses" PhD thesis, department of civil engineering, The University of Nottingham, United Kingdom, 1988.
- [7] Packer J.A. and Henderson J.E. "Hollow Structural Section Connections and Trusses" - A Design Guide. Canadian Institute of Steel Construction, Toronto, Canada, ISBN 0-88811-086-3. 1997.
- [8] Eurocode3, 1992, "Design of Steel Structures" - Annex K: Hollow Section Lattice Girder Connections, ENV 1993-1-1, CEN.
- [9] Saidani M., "The effect of the flexibility of the joints on the behavior of RHS trusses." PhD thesis, department of civil engineering, The University of Nottingham, United Kingdom, 1991.
- [10] Rondal J., Wurker K.G., Dutta D., Wardenier J., Yeomans N., : Structural Stability of Hollow Sections., Ed. by CIDECT, Verlag TÜV Rheinland, Cologne. 1992
- [11] Packer J.A., "Theoretical Behaviour and Analysis of Welded Steel Joints with RHS Chords, CIDECT, Final Report 5U-78/19.
- [12] Abaqus., (Version 6.10), User's manual. Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., Pawtucket, Rhode Island, USA. 2010
- [13] Zhao X.L., Wardenier J., Packer J.A., Van der Vegte G.J. "Current static design guidance for hollow-section joints" Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, Volume 163, Issue 6, 1 Dec 2010(361–373)
- [14] Radu D., Galatanu F.T., "Optimization solutions for truss beams elements welded joints" UDK: 624.072.22 DOI:10.14415/konferencija GFS 2016.009