

Renforcement par soudure d'une section d'un élément de structure métallique

A section reinforcement of a metal structure element by welding

Nadia Kouider¹, Yazid Hadidane¹ & Fouzia Bouabdallah²

¹ Laboratoire de Génie Civil (LGC), Département de Génie Civil, Faculté des sciences de l'ingénierie, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.

² Département de Génie Civil, Faculté des sciences et des sciences appliquées, Université Larbi Ben M'hidi, BP 358, Oum El Bouaghi, Algérie.

RESUME

Historique de l'article

Reçu le 21/02/2019

Révisé le 31/03/2019

Accepté le 02/05/2019

Mots clés

Soudage, Modélisation, Déformations résiduelles, Eléments finis.

Keywords

Welding, Modeling, Residual deformations, Finite elements.

Le procédé de soudage présente une modélisation très complexe car il implique des couplages entre des phénomènes mécaniques, thermiques et métallurgiques qui conduisent à la création des contraintes et des déformations résiduelles irrégulièrement distribuées au niveau de la section soudée. Cet article porte sur une étude expérimentale du comportement thermomécanique d'une poutre isostatique en profilé laminé renforcée par des éléments métalliques, assemblés au moyen de cordons de soudures et sollicitée par une charge concentrée (essai de flexion trois points). L'impact de la technique de soudure employée (cordons continus et discontinus) sur le comportement de l'élément est analysé. Des modèles numériques sont étudiés en utilisant un code de calcul basé sur la méthode des éléments finis où l'effet thermique dû à l'opération de soudage est pris en considération. Les résultats obtenus sont en très bon accord avec ceux expérimentaux.

ABSTRACT

The welding process presents a very complex modelling because it involves couplings between the mechanical, thermal and metallurgical phenomena which lead to the creation of stresses and residual strains irregularly distributed at the welded section level. This paper relates to a thermomechanical behavior's experimental study of an isostatic beam in reinforced rolled section of metallic elements by means of weld seams and solicited by a concentrated load (three-point bending test). The welding technique impact used (continuous and discontinuous weld seams) on the element behaviour is analysed. Numerical models are studied using a calculation code based on the finite element method, and the thermal effect due to the welding operation is taken into consideration. The obtained results are compared with those obtained experimentally. The results obtained are in very good agreement with the experimental ones.

* Auteur correspondant

Nadia Kouider

Laboratoire de Génie Civil (LGC), Département de Génie Civil, Faculté des sciences de l'ingénierie, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.

Email: nadia.kouider23@gmail.com

1. INTRODUCTION

Les pays industrialisés ont acquis au fil des années un patrimoine bâti considérable. Il s'agit de bâtiments privés ou publics, de ponts, de routes et de sites industriels. Ces ouvrages vieillissent et s'endommagent par la dégradation des matériaux (En Amérique, environ 70 000 ponts autoroutiers en acier ont été classés comme ayant une déficience structurelle)[1], et pour garantir la sécurité des personnes ou le confort des usagers il faut intervenir ; on parle alors de la réfection ou de la rénovation. Quelquefois c'est la destination de l'ouvrage qui change, d'où l'adaptation aux nouveaux fonctionnements par l'utilisation du terme "générique de la réhabilitation"[1]. Les travaux de rénovation ou de réhabilitation concernent tous les corps d'état du métier de la construction: les réseaux, les gros œuvres, les corps d'état secondaires et éventuellement l'architecture. La réhabilitation des structures est nécessaire à chaque fois qu'il y a des erreurs de conception, des défauts d'exécution ou bien des conditions de chargements inattendus [2]. Elle consiste à améliorer le niveau de performance d'un système structural ou de quelques éléments de celui-ci selon l'état de l'endommagement de la structure. Elle peut être subdivisée en deux catégories : réparation ou renforcement. Selon la littérature, les nouvelles techniques s'orientent vers le renforcement par matériaux composites qui peuvent présenter d'énormes problèmes [3, 4, 5, 6,7], On cite : le faible module d'élasticité du composite par rapport à l'acier, ainsi que le décollement du renfort dans les poutres renforcées [8]. Le remplacement des structures métalliques détériorées n'est pas une pratique de solution privilégiée car les coûts engagés sont très importants. En outre, la détérioration peut affecter un composant de la structure donc la solution la plus économique est le renforcement des parties détériorées uniquement [1]. La technique de renforcement conventionnel est utilisée pour améliorer la performance des structures métalliques en augmentant la section par l'ajout des plaques métalliques de renforcement raccordées et assemblées par soudage, boulonnage ou rivetage[9]. Cette technique est une solution pratique pour la réhabilitation des conceptions existantes, mais elle présente certains inconvénients tels que la corrosion potentielle, la fatigue due à la concentration des contraintes résiduelles dues au moyen d'assemblage par soudures [1,10]. Le procédé de soudage assure les liaisons par continuité de la matière à l'échelle micro structurelle (adhérence entre les atomes) et doit impérativement permettre la transmission d'efforts internes d'une barre à l'autre [11]. Il présente plusieurs problèmes par l'intervention de nombreux phénomènes physiques de l'ordre de thermique (chauffage et refroidissement du matériau), de la métallurgie (solidification et des phases du matériau), de la mécanique des fluides des fluides (fusion du matériau) et de la mécanique des solides (fatigue, torsion , fissures ,et l'apparition de contraintes et déformations résiduelles)[12]. Ceci implique la bonne transmission des sollicitations due à l'assemblage monolithe, en plus de la bonne étanchéité et productivité. En outre, la mise en place de la soudure reste simple et rapide. Ainsi l'amélioration vis-à-vis de l'aspect esthétique peut être obtenue en dispensant les pièces secondaires, tels les goussets, etc...

Dans cette optique, le présent travail va concerner l'étude de l'état de déformation-contrainte d'une section en I renforcée au moyen de cordons de soudure réalisées de deux manières différentes (cordons continus et discontinus) pour la limitation de contraintes résiduelles tout en considérant le comportement thermomécanique..

2. ETUDE EXPERIMENTALE

2.1. Programme de tests

La préparation des corps d'épreuves pour l'étude expérimentale porte sur l'étude du comportement en flexion des poutres renforcées par des éléments au moyen de soudures et qui a eu lieu au laboratoire du département de Génie Civil à l'Université d'Annaba.

2.2. Protocoles expérimentaux

Deux poutres en acier en forme de I (IPE 100 selon la norme européenne EN 10025) ont été sélectionnées pour la campagne expérimentale (Tab. 1). La section des poutres a été renforcée avec deux cornières à ailes égales de 50x50x5 mm³ (Tab. 2) comme montré sur la figure 1 et soudées au niveau de la semelle inférieure. La nuance des aciers utilisés est S235. L'assemblage est réalisé par soudure de type ordinaire mono passe.

Tableau 1. Caractéristiques géométrique et mécanique de la section en I

POUTRE I- dimensions (mm)							
Base B	Hauteur H	Épaisseur d'âme	Épaisseur de semelle	Longueur	Module de Young E (MPa)	Contraintes	
						Limite d'élasticité f_y (MPa)	Limite de rupture f_u (MPa)
55	100	4.1	5.7	1000	200 000	235	360

Tableau 2. Caractéristiques géométrique et mécanique de la cornière

Cornière 50x50x5- dimensions (mm)							
Base	hauteur	Épaisseur	Longueur	Module de E(MPa)	Contraintes		
					f_y (MPa)	f_u (MPa)	
50	50	5	1000	200 000	235	360	

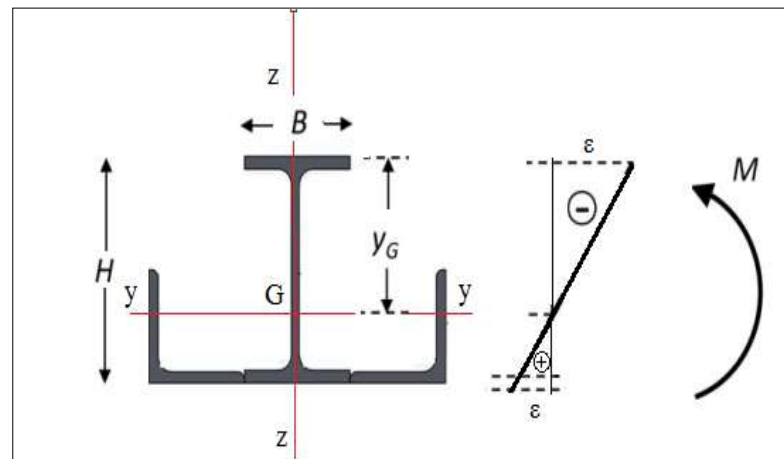


Figure 1. Section d'étude (Poutre en I renforcée avec 2 cornières)

Les caractéristiques géométriques de chaque élément faisant partie de la section globale peuvent être calculées sur la base des données initiales (Fig. 2).

$$A_{pq} = b_{pq} t_{pq}; I_{pq} = (t_{pq} b_{pq}^3 \cos^2 \alpha_{pq} + b_{pq} t_{pq}^3 \sin^2 \alpha_{pq})/12 \tag{1}$$

Pour cette section de l'élément de base non renforcé et celle de chacun des éléments du renforcement, on applique les formules (2, 3 et 4) (Fig. 2).

$$A_p = \sum A_{pq} \tag{2}$$

$$S_{px'} = \sum b_{pq} t_{pq} y_{pq} \tag{3}$$

$$y_p = S_{px'}/A_p ; I_{px} = \sum [I_{pq} + A_{pq} (y_p - y_{pq})^2] \tag{4}$$

Dans ces formules, le signe somme « (Σ) » est appliqué à tous les éléments, entrant dans la composition de l'élément renforcé.

$$A_T = \sum A_p ; S_{Tx'} = \sum A_p y_p ; y_T = S_{Tx'}/A_T \tag{5}$$

$$I_{Tx} = \sum [J_{px} + A_p (y_T - y_p)^2] \tag{6}$$

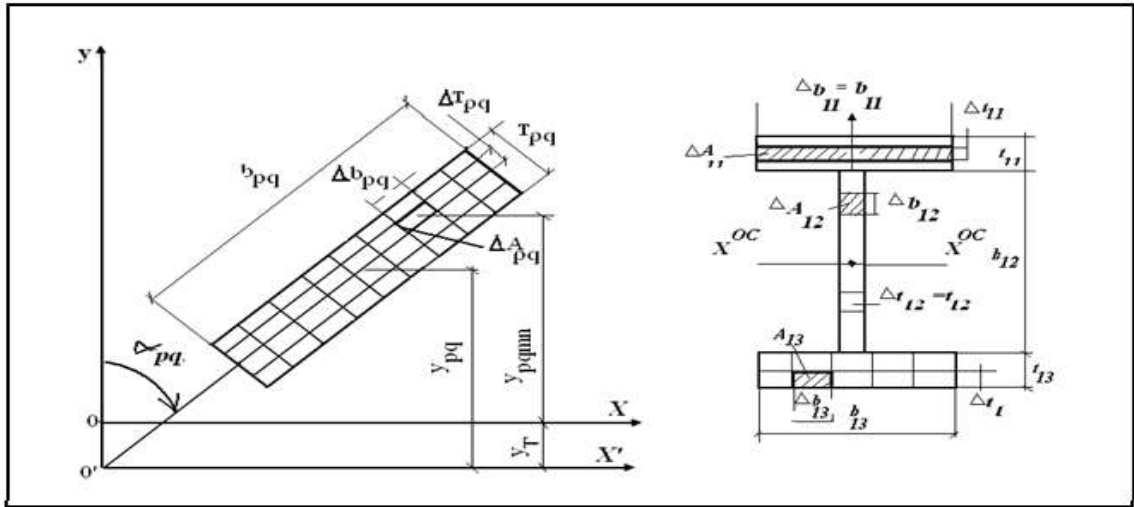


Figure 2. Schémas de la modélisation en surfaces élémentaires

L'assemblage par soudage à l'arc avec apport du métal à électrode enrobée manuel, est un procédé particulier d'assemblage assurant les liaisons par continuité de la matière.

2.2.1 Description et spécifications des corps d'épreuve

Les tests ont été réalisés sur les deux poutres en flexion comme citées précédemment où chacune a été renforcée en utilisant des cordons différents à savoir cordons continus pour la poutre 1 (Fig. 3b) et discontinus pour la poutre deux (Fig. 3c) dénommées respectivement PRSC et PRSD.



Figure 3. Opérations de soudure

(1) IPE100, (2) Cornière à L (50 x 50 x 5) mm, (3) Arc de soudure.

(a) Préparation des spécimens étudiés par soudage ; (b)- Cordons continus ; (c)- Cordons discontinus

Les flèches dues à la soudure des éléments renforcés augmentent avec la croissance de leur flexibilité, accompagnées par une diminution de la rigidité des sections et de l'augmentation de la charge initiale.

La répartition des cordons discontinus est montrée sur la figure 4 correspondant à l'illustration sur la figure 3c, avec une longueur de 20-30 millimètres et un pas d'espacement entre les cordons de 300-500 millimètres [13].

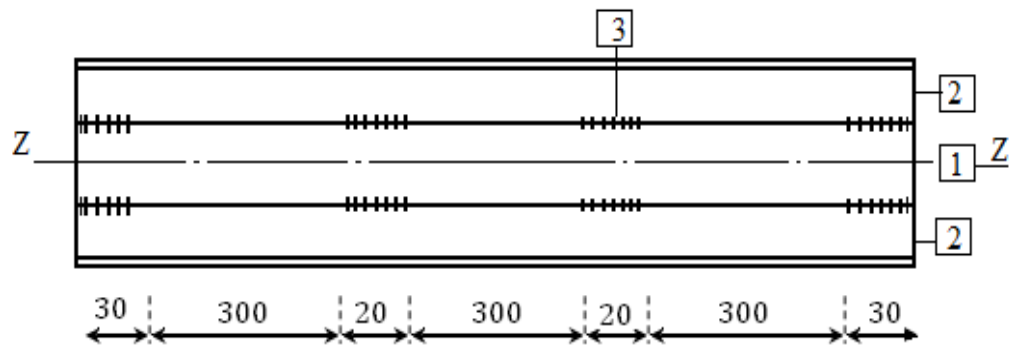


Figure 4. Disposition des cordons de soudure discontinue

(1) IPE100, (2) Cornière (50 x 50 x 5) mm, (3) Cordon de soudure

2.2.2 Procédure d'essai et instruments utilisés

L'essai retenu est un essai de flexion 03 points. Les poutres objet d'étude sont simplement appuyées et testées sur une machine de flexion de type «Strassentest» de capacité 100 KN. Le chargement est statiquement muni avec un vérin hydraulique. Les essais sont effectués par des paliers de charge de 5 KN. Avec la croissance du chargement appliqué, les déformations et les flèches sont enregistrées. Le montage des poutres est illustré sur la figure 5. [14,15]. L'essai de flexion monotone trois points est réalisé suivant les instructions de la norme NFT57-105. Les poutres ont été testées sous différents cycles de chargements et déchargements jusqu'à la ruine du spécimen (Fig. 5).

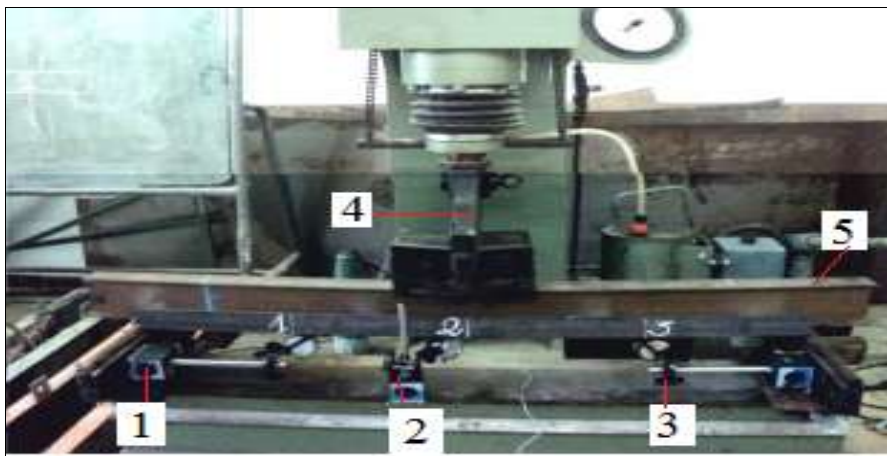


Figure 5. Essai de flexion 03 points pour PRSC et PRSD

1-2-3 Compareurs; 4- Vérin ; 5- IPE 100

Le but de ces investigations est d'étudier l'influence des types de cordon sur l'état de la relation contrainte-déformation des éléments renforcés et en déduire les contraintes résiduelles provoquées lors de l'opération de soudage. Les flèches sont mesurées à l'aide de comparateurs (Fig. 6c) placés au milieu (comparateur 2), au $\frac{1}{4}$ (comparateur 1) et au $\frac{3}{4}$ (comparateur 3) sous la semelle inférieure de la poutre. Les déformations sont mesurées à l'aide de jauges électriques placées au milieu de la semelle inférieure (Fig. 6b). Le facteur de jauge est $K=2,09$. Les lectures de déformation sont pilotées par un pont d'extensométrie (Fig. 6a) à 10 voies. La figure 6 rassemble et montre clairement le dispositif et le montage complet de l'expérimentation de mesure.

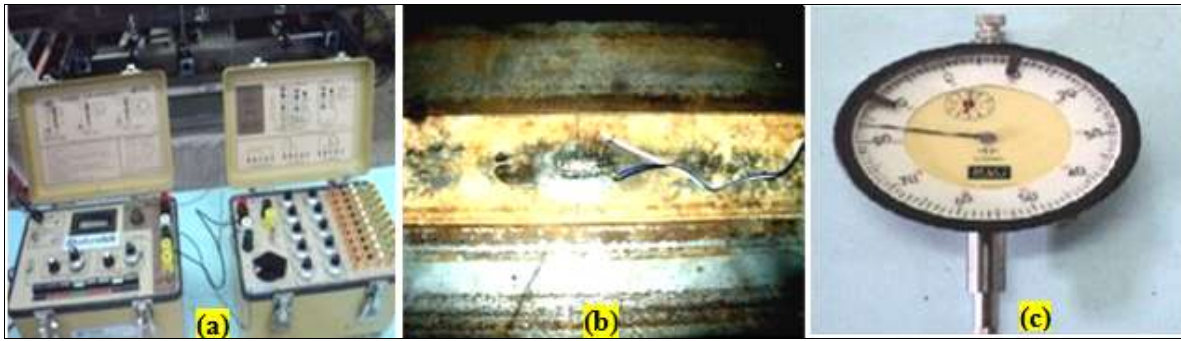


Figure 6. Equipements de mesure
a- Pont d'extensométrie; b- Jauge ; c- Compensateurs

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés sur le graphe en figure 7 pour plusieurs cycles de chargement et déchargement [16]. On remarque que pour la poutre réalisée avec des cordons discontinus (PRSD), la courbe charge-déformation croît linéairement jusqu'à une valeur de 6000 N, branche caractéristique du domaine élastique. La branche de déchargement a la même allure que celle du 1^{er} chargement mais avec une déformation résiduelle ε de l'ordre de $1,66 \cdot 10^{-3}$. La seconde branche caractérisant le 2^{ème} cycle de chargement montre une augmentation de la charge limite élastique jusqu'à une valeur de 70000N, s'accompagnant de déformations plastiques à cause du phénomène d'écrouissage. Pour la poutre réalisée avec des cordons continus (PRSC), la courbe charge-déformation croît linéairement jusqu'à une valeur de 70000 N, branche caractéristique du domaine élastique. La branche de déchargement a la même allure que celle du 1^{er} chargement mais avec une déformation résiduelle ε de l'ordre de $0,16 \cdot 10^{-3}$ évoluant jusqu'à une valeur de $0,46 \cdot 10^{-3}$ pour les autres cycles de chargement.

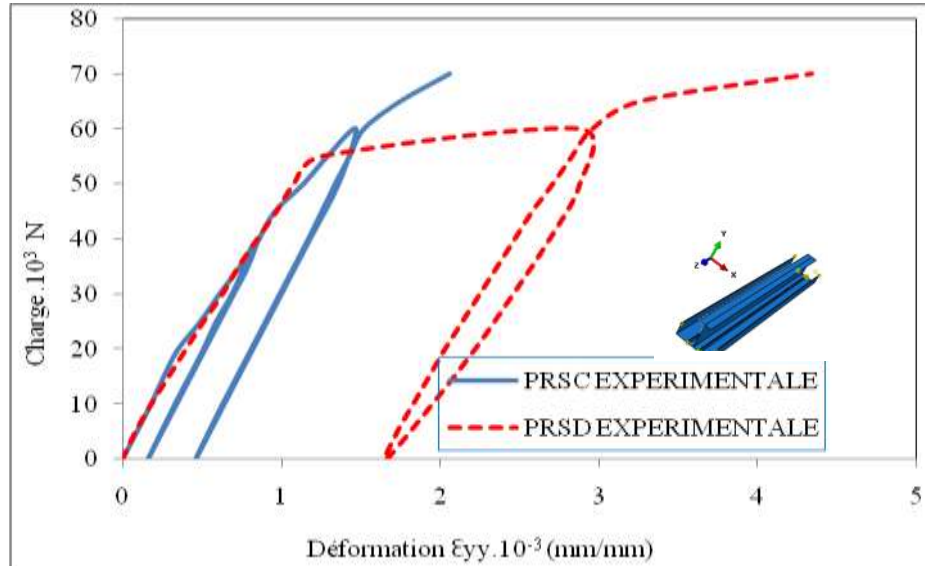


Figure 7. Courbes de variation (charge-déformation) expérimentales au milieu de la poutre renforcée avec des cordons de soudure continue et discontinue

Les variations des flèches mesurées au $\frac{1}{4}$, au milieu et au $\frac{3}{4}$ de la poutre sont représentées sur la figure 8. Au milieu des poutres, les flèches pour les 2 types ont la même allure jusqu'à une valeur de la charge égale à 20 KN. Au delà de cette valeur, la flèche dans la poutre type PRSC augmente rapidement par rapport à celle dans la poutre PRSD. Cela est dû probablement à la présence de contraintes résiduelles provoquées par les cordons de soudure. Aux $\frac{1}{4}$ et $\frac{3}{4}$ de la poutre, les courbes représentant les variations des flèches ont la même allure (Fig. 9 et Fig. 10).

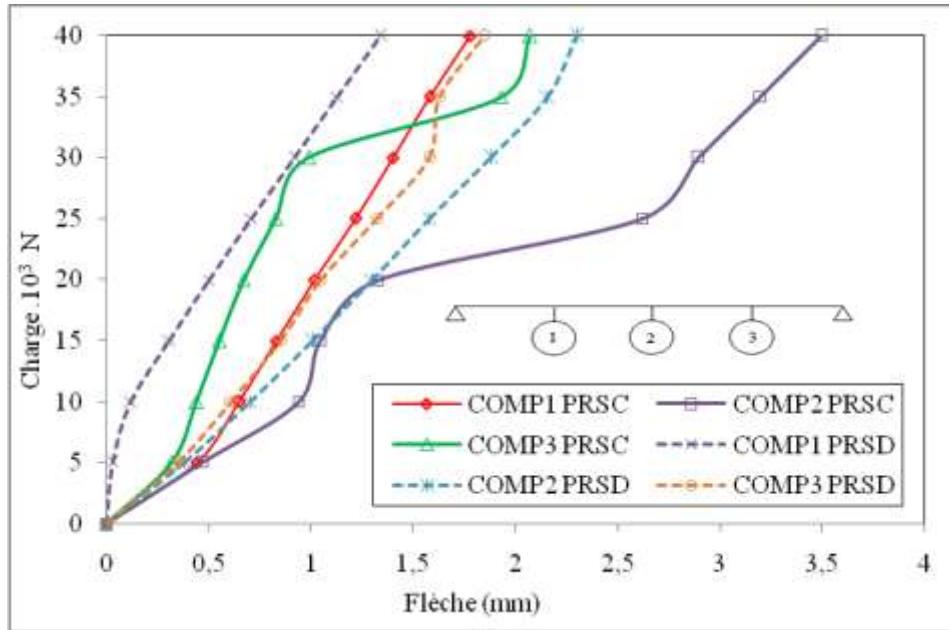


Figure 8. Courbes (Charge-Flèche) expérimentales des poutres renforcées

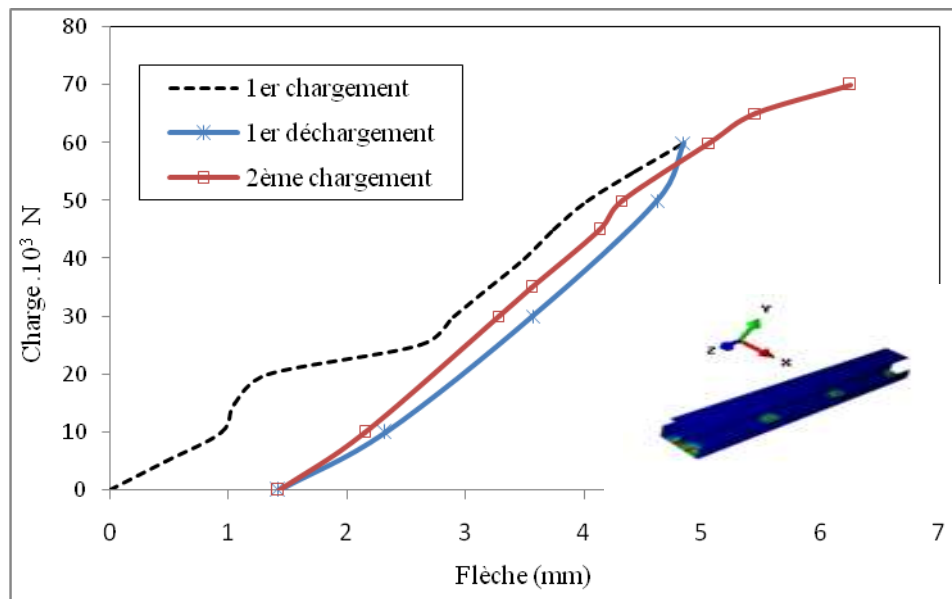


Figure 9. Courbes (Charge-Flèche) expérimentales au milieu des poutres renforcées avec soudures discontinues (PRSD)

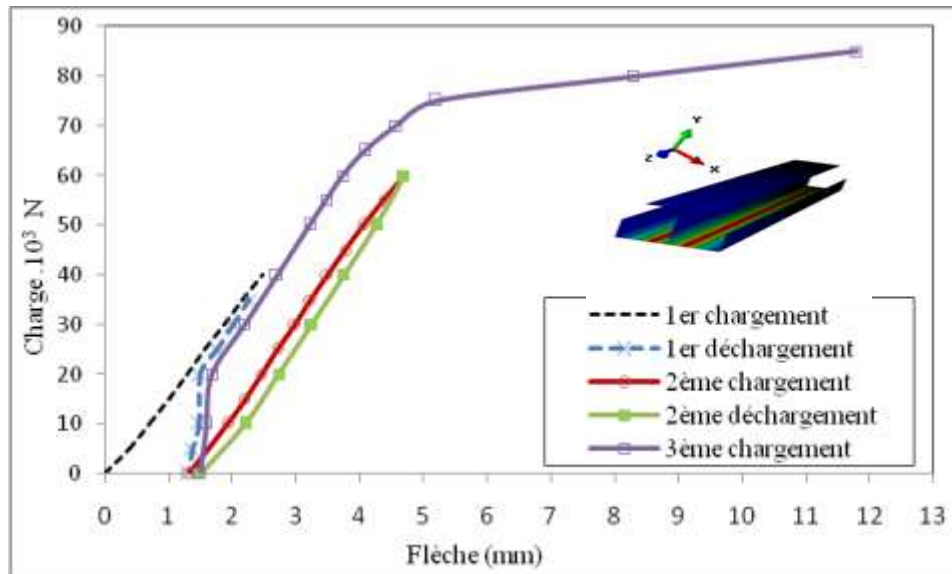


Figure 10. Courbes (Charge-Flèche) expérimentales au milieu des poutres renforcées avec soudures continues (PRSC)

4. ANALYSE NUMERIQUE

4.1. Introduction

Dans ce travail, un modèle d'éléments finis a été développé pour la simulation numérique en utilisant le code commercial ABAQUS[4], et cela afin d'évaluer l'état de contraintes et de déformations dans les poutres renforcées dans le but de les valider avec les résultats expérimentaux. Tous les spécimens sont modélisés en utilisant des éléments du type shell et des éléments solides 3D. La modélisation du procédé de soudage est un problème très complexe car elle implique à la fois des couplages entre des phénomènes mécaniques, thermiques et métallurgiques. De point de vue thermique, des échanges de chaleur dépendent directement du type de contact choisi dans la modélisation (Fig. 11). C'est pourquoi il est important de bien comprendre et de décrire les différents choix proposés par le logiciel concernant ce contact, dont les propriétés thermomécaniques utilisées sont comme suit : densité ($\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$), module de Young ($E = 200\,000 \text{ MPa}$), coefficient de poisson ($\nu = 0,3$), conductivité thermique (46 K (W/m/K)), chaleur spécifique 460 cp (J/Kg/K) et coefficient de dilatation ($\alpha = 12 \times 10^{-6}$).

La représentation de la soudure dans le logiciel ABAQUS se fait par la création des interactions de type WELD qui exige une adhérence parfaite dans toutes les directions de point de vue degré de liberté entre les nœuds des pièces à assembler. Ainsi, les éléments rigides qui représentent le cordon de soudure sont le moyen de liaison entre l'élément poutre et les éléments de renforcements par la connexion de type WELD. La détermination de distribution de la température lors de l'opération de soudage est très délicate à cause du problème de l'échauffement de l'élément par la source de chaleur. Ceci provoque une distribution irrégulière de la température dans l'espace et dans le temps, influant directement sur les caractéristiques mécaniques et physiques du métal. Un certain nombre de simplifications pour la détermination des diagrammes de distribution de la température telle que l'idéalisation des facteurs (champ de la température pendant la soudure) et du milieu déformable soumis à la température. Pour la distribution de la température au niveau de la semelle renforcée, une concentration de la température au niveau de la ligne de liaison par soudure atteint la valeur de 1200C° qui diminue en s'éloignant du cordon (Fig. 12a). L'âme est aussi affectée thermiquement à cause de l'effet de la conductivité du métal (Fig. 12b).

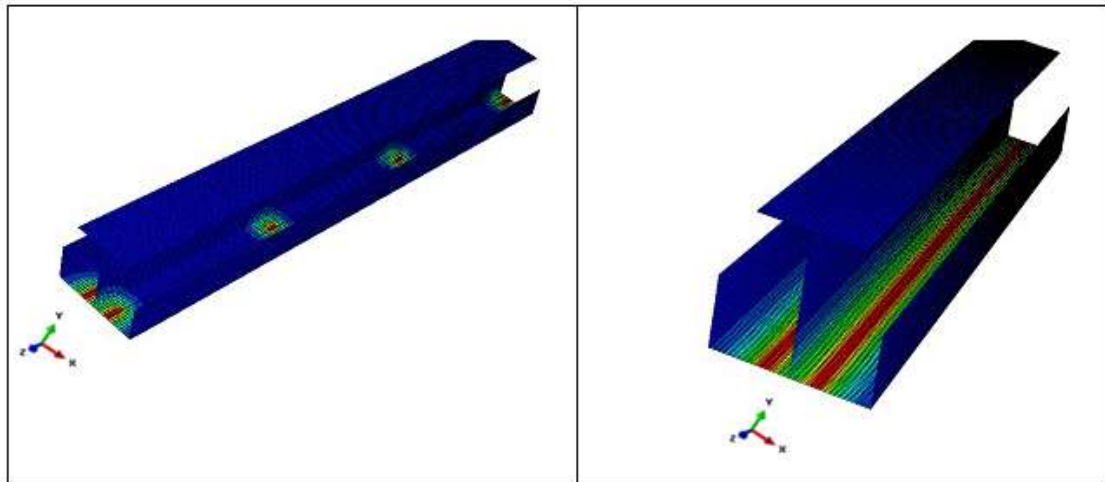


Figure 11. Distribution de la température au niveau du cordon de soudure dans les poutres renforcées

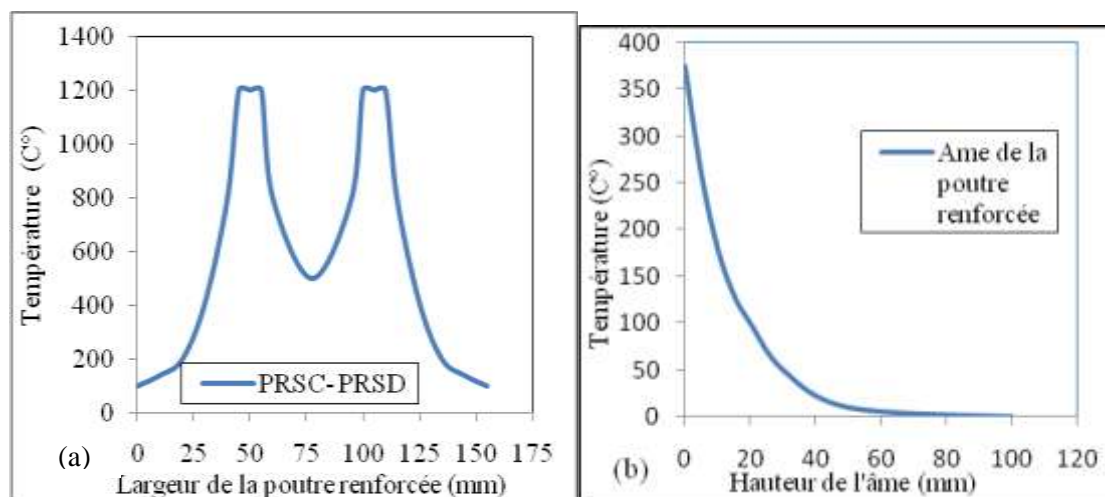


Figure 12. Distribution de la température due aux cordons de soudure

Les résultats d'analyse en non linéaire matérielle ont montré que les deux poutres renforcées ont un comportement élasto-plastique (Figure13). Avec l'augmentation de l'intensité de la charge de flexion, les déformations évoluent et la poutre se plastifie avec la création de déformations irréversibles. Quand elle atteint la valeur de 50 KN correspondant à des valeurs de contraintes de 224.5 MPa et 233.75 MPa respectivement pour les poutres du type PRSC et PRSD. Au delà de cette valeur, le matériau se plastifie dépassant ainsi sa limite d'élasticité $f_y = 235$ MPa. Pour une charge concentrée de 60 KN correspondant à une contrainte de 267 MPa, on a obtenu une diminution des déformations pour la poutre type (PRSC) de l'ordre de 96% en comparaison avec la poutre en I non renforcée. Par contre pour la poutre type (PRSD), la réduction de déformation est de l'ordre de 90% avec une charge de 60 KN correspondant à une contrainte de 252 MPa. De même, une diminution des contraintes pour la poutre type (PRSC) de l'ordre de 22% est obtenue en comparaison avec la poutre en I non renforcée. Par contre pour la poutre type (PRSD), la réduction de contraintes est de l'ordre de 27%. Cette différence revient probablement à la présence de contraintes résiduelles résultantes de l'opération de soudage.

Les déformations au milieu de la poutre évoluent avec l'augmentation de la charge pour atteindre une valeur de 0,045 pour la poutre type (PRSC) et 0,062 pour celle de type (PRSD).

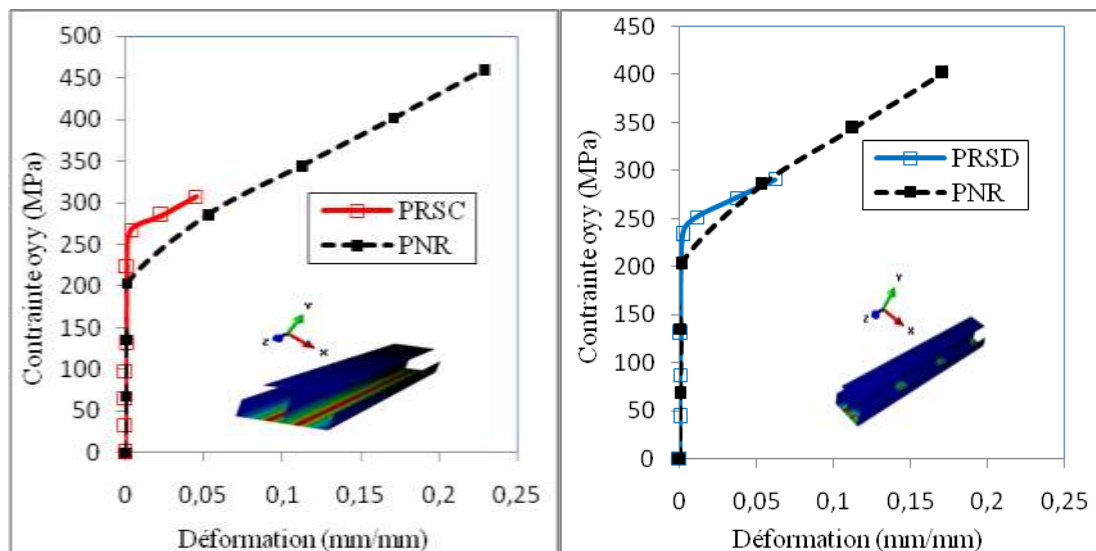


Figure 13. Courbes comparatives de l'état Contrainte – Déformation des poutres renforcées avec la poutre non renforcée

Le calcul des flèches au milieu de la poutre a montré pratiquement un comportement identique en raison des faibles valeurs obtenues pour les deux types de poutres renforcées et cela jusqu'à une valeur de la charge égale à 50 KN. Au-delà de 40 KN la poutre non renforcée (PNR) en I a présenté un accroissement rapide de la flèche par rapport à celles des poutres du type PRSD et PRSC respectivement de 66% et 75% (Fig. 14).

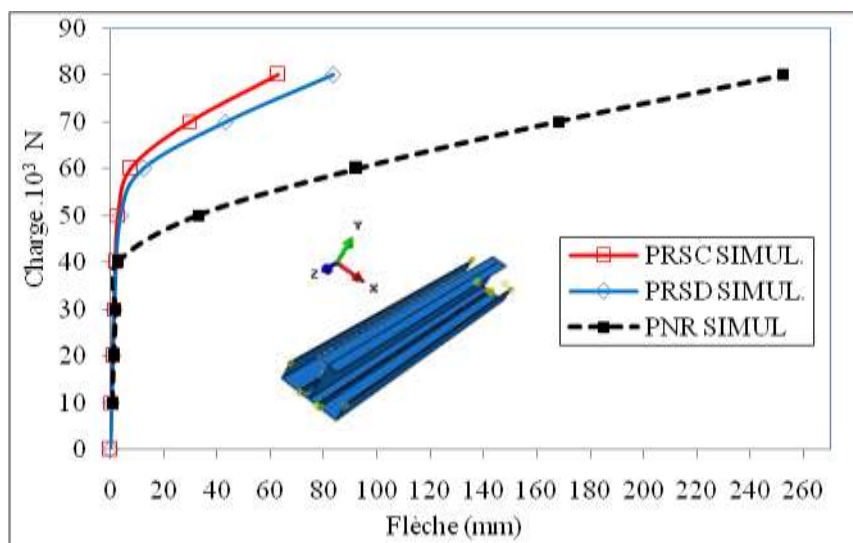


Figure 14. Etat de (Charge -Flèche) au milieu de la semelle renforcée

5. ETUDE COMPARATIVE

L'analyse des courbes numériques et expérimentales a montré un comportement élasto-plastique pour les deux types de poutre. Sur la figure 15a concernant la poutre de type PRSC, et pour un chargement jusqu'à 20 KN, les deux courbes sont presque confondues avec des petites déformations purement élastiques. La différence de résultats numérique et expérimental ne dépasse pas 16%. Avec une charge appliquée de flexion de 50 KN, la même valeur de déformation est obtenue expérimentalement et numériquement qu'après le 2ème cycle de chargement (intersection des deux courbes). Au-delà de cette valeur (> 50 KN), le matériau s'est plastifié en montrant un comportement non linéaire. Sur la figure 15b concernant la poutre de type PRSD, et pour un chargement jusqu'à 40 KN, les deux courbes sont presque confondues avec des petites déformations purement élastiques. La différence de résultats numérique et expérimentale ne dépasse pas 2%. Avec une charge appliquée

de flexion de 50 KN, la même valeur de déformation est obtenue expérimentalement et numériquement qu'après le 1^{er} cycle de chargement. Au 2^{ème} cycle une déformation résiduelle de l'ordre de $1,66 \cdot 10^{-3}$ est obtenue. Cette valeur est probablement due à la distribution des cordons de soudure selon la longueur. Au-delà de cette valeur (plus de 50 KN), le matériau s'est plastifié en présentant ainsi un comportement non linéaire avec apparition d'une zone remarquable au niveau du point d'application de la charge concentrée (Fig. 16).

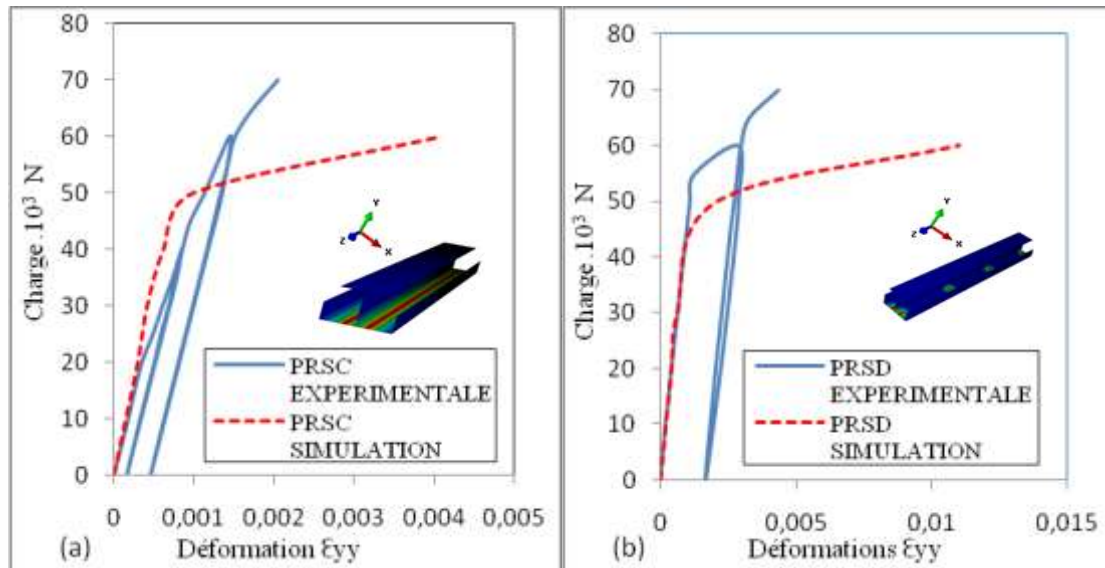


Figure 15. Comparaison de l'état (σ - ϵ) de la poutre renforcée

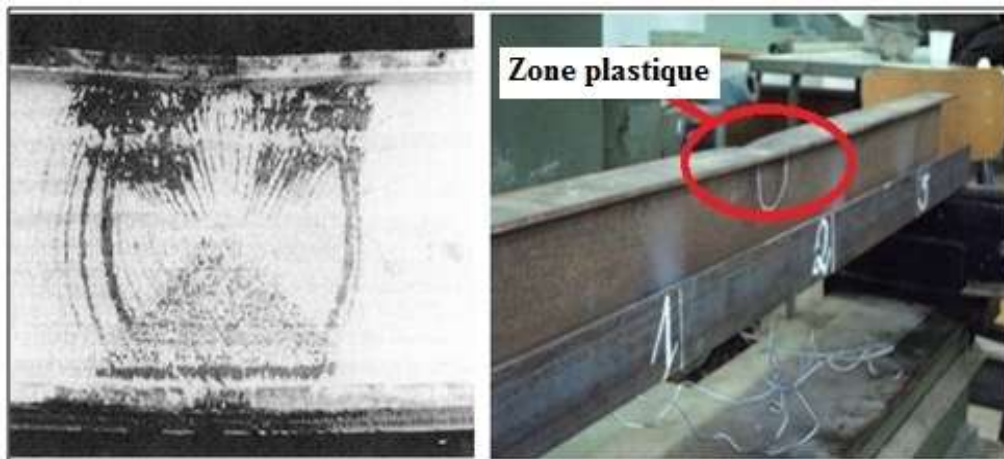


Figure 16. Plastification de la poutre renforcée

L'analyse des flèches au milieu des spécimens a montré un comportement similaire pour les deux poutres jusqu'à une charge de flexion de 20 KN (Fig. 17a). Expérimentalement et jusqu'à une charge de 20 KN, les courbes de flèche pour les deux types de poutres coïncident. L'influence du type de soudure n'est pas significative dans cette plage. Au-delà de cette valeur de 20 KN la courbe de flèche de PRSC a divergé par rapport à celle de type PRSD jusqu'à aboutir une différence de flèche de l'ordre de 62% probablement à cause de l'effet de la température de soudage. Par contre numériquement l'écart de flèche pour les deux types de poutre n'est pas significatif et atteint 8%. Les valeurs de flèche obtenus au $\frac{1}{4}$ de la poutre PRSC ont montré une bonne corrélation entre les résultats numériques et ceux expérimentaux. Par contre une différence de valeurs de flèches est constatée au $\frac{3}{4}$ de la poutre (Fig. 17b). Le même comportement est constaté notamment pour la poutre du type PRSD (Fig. 17c).

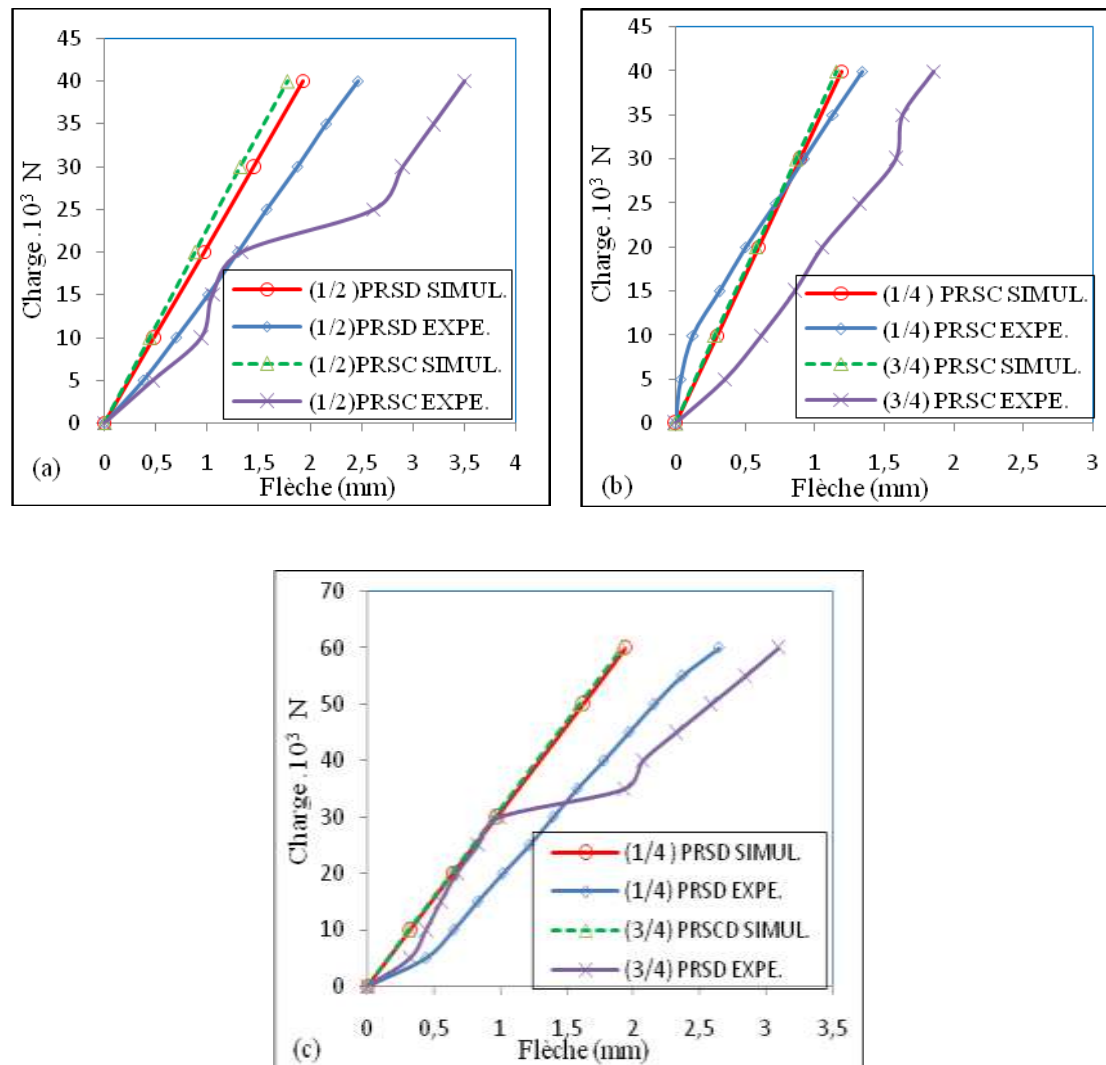


Figure 17. Etat du premier cycle de chargement (Charge-Flèche) au milieu, $\frac{1}{4}$ et $\frac{3}{4}$ de la poutre renforcée
 (a) Au milieu de PRSD et PRSC, (b) Au $\frac{1}{4}$ et $\frac{3}{4}$ de PRSC, (c) Au $\frac{1}{4}$ et $\frac{3}{4}$ de PRSD

6. CONCLUSIONS

- L'étude de renforcement d'une poutre en profilés laminés avec la technique d'augmentation de section (addition des cornières) sous le chargement pour lequel elle est conçue, a permis d'obtenir une diminution très remarquable des contraintes, des déformations et des flèches.
- L'analyse numérique en non linéarité matérielle et en prenant en compte l'effet thermo-mécanique a confirmé que les deux poutres sujet d'analyse ont un comportement élastique jusqu'à une charge de 50 KN. Au delà de cette valeur les déformations ont évolué et la poutre s'est plastifiée avec création de déformations plastiques irréversibles. En comparaison avec la poutre en I non renforcée il a été remarqué une réduction de déformations de l'ordre de 96% et 90% pour les deux types de poutres PRSC et PRSD respectivement.
- De point de vue flèches, une diminution de l'ordre de 91% et 86% et pour les deux types de poutres PRSC et PRSD est successivement obtenue. De même, une chute des contraintes de l'ordre de 22% et 27% pour les deux types de poutres PRSC et PRSD est notée respectivement. Cette différence est due probablement à la présence de contraintes résiduelles résultantes de l'opération de soudage.
- Pour la répartition de la température lors de l'opération de soudage, on a remarqué une distribution non uniforme localisée au niveau des cordons et dans la zone affectée thermiquement. Par contre les autres zones ne sont pas affectées par la température.

L'essai qui concerne le renforcement des poutres par soudure discontinue a donné une déformation plastique importante dès le premier déchargement à cause de la liaison insuffisante de la poutre avec les éléments de renforcement. Par contre la poutre renforcée avec soudure continue a donné une petite déformation plastique résiduelle qui a évolué à partir du 3^{ème} cycle de chargement. En outre les deux poutres ont eu un comportement similaire suite à l'analyse des déplacements.

L'étude comparative a confirmé la fiabilité des résultats obtenus numériquement et expérimentalement du modèle.

- Le renforcement de la poutre avec des cordons de soudure discontinue a présenté un comportement presque similaire avec la poutre renforcée avec des soudures continues.

7. REFERENCES

- [1] Sweedan A.M.I., Alhadid M.M.A., & El-Sawy K.M., 2016. Experimental study of the flexural response of steel beams strengthened with anchored hybrid composites, *Thin-Walled Structures*, Vol. 99, 1–11.
- [2] Carpinteri A., Cornetti P., & Pugno N., 2009. Edge debonding in FRP strengthened beams: Stress versus energy failure criteria, *Engineering Structures*, Vol. 47, 2436–2447.
- [3] Colombi P., 2006. Reinforcement delamination of metallic beams strengthened by FRP strips: Fracture mechanics based approach, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 73, 1980–1995.
- [4] Deng J. & Lee M.M.K., 2007. Fatigue performance of metallic beam strengthened with a bonded CFRP plate, *Composite Structures*, Vol. 78, 222–231.
- [5] Zhou H., Attard T.L., Wang Y., Wang Jy-A., & Ren F., 2013. Rehabilitation of notch damaged steel beams using a carbon fiber reinforced hybrid polymeric-matrix composite, *Composite Structures*, Vol. 106, 690–702.
- [6] Colombi P., & Fava G., 2015. Experimental study on the fatigue behaviour of cracked steel beams repaired with CFRP plates, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 145, 128–142.
- [7] Altaee M.J., Cunningham L.S., & Gillie M., 2017. Experimental investigation of CFRP-strengthened steel beams with web openings, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 138, 750–760.
- [8] Phama P.V., Mohareba M., & Famb A., 2018. Lateral torsional buckling of steel beams strengthened with GFRP plate, *Thin-Walled Structures*, Vol. 131, 55–75.
- [9] Narmashiri K., & Jumaat M.Z., 2011. Reinforced steel I-beams: A comparison between 2D and 3D simulation, *ScienceDirect*, Vol. 19, 564–585.
- [10] Siddique M.A. & El Damatty A.A., 2013. Improvement of local buckling behaviour of steel beams, *Composite Structures*, Vol. 96, 44–56.
- [11] Muzeau J-P., 2014. La construction métallique avec les Eurocodes. Ed. Afnor Eyrolles, France, 453p.
- [12] Makhoul H., 2008. Modélisation numérique de soudage à l'arc des aciers. Thèse de doctorat en Mécanique. Ecole nationale supérieure des mines (Paris). 275p
- [13] Rebrov I S., 1988. Renforcement des éléments de structures métalliques: Conception et calcul. Ed. des constructions. Leningrad, 288p.
- [14] Kallel-Kamoun I., 1999. Analyse mécanique de l'essai de flexion par flambement post-critique. Thèse de doctorat en Génie des Matériaux. Université de Sherbrooke (Canada). 150p.
- [15] Gioncu V., & Anastasiadis A., 2014. Plastic coupled instabilities of I-shaped steel beams, *Thin-Walled Structures*, Vol. 81, 67–77.
- [16] Tabrizi S., Kazem H., Rizkalla S., & Kobayashi A., 2015. New small-diameter CFRP material for flexural strengthening of steel, *Construction and Building Materials*, Vol. 95, 748–756.