V.2.2.1 Contraintes résiduelles transversales (Selon xx)

Les contraintes résiduelles de soudage des panneaux raidis sont analysées dans cette partie, la figure V.16 montre la distribution des contraintes résiduelles ultimes transversales S11 (contrainte normale agissant dans la direction X). On peut constater que les contraintes transversales de la surface supérieure du panneau raidi à la position du cordon de soudure sont des contraintes de traction. L'amplitude de la contrainte de traction est d'environ 0.9 fois et 1,1 fois la limite d'élasticité du matériau pour la surface supérieure. La valeur maximale de la contrainte résiduelle transversale de l'ensemble du modèle se produit dans la juxtaposition de l'angle de soudure.

Les valeurs de crête (pic) se situent dans les régions adjacentes aux cordons de soudure avec un dépassement de l'amplitude de la limite d'élasticité du matériau (275 MPa). L'état de contraintes est réduit aux extrémités de la plaque raidie, car la dissipation thermique est importante à ce niveau (Chute de 71.8 % dans le cas de trois (03) raidisseurs).



Figure V.16 Courbes de contraintes résiduelles transversales S11 dans les plaques raidies

V.2.2.2 Contraintes résiduelles longitudinales (Selon yy)

L'état de la distribution des contraintes résiduelles longitudinales est obtenu en se basant sur la simulation par élément fini, au niveau de la section médiane des plaques raidies L2. La figure V.17 présente la répartition sur l'axe X de la contrainte verticale S22, qui est en fait la contrainte normale agissant dans la direction Y et qui montre clairement que les contraintes de traction ont été développées dans la zone de soudure. Ces contraintes résiduelles en traction diminuent progressivement dans la direction transversale en s'éloignant de l'axe de la soudure, et qui deviennent des contraintes résiduelles en compression vers le bord de la plaque (avec un changement de signe).

En effet, lors de la phase de refroidissement et lorsque la température de la zone soudée diminue rapidement, le métal de soudure a tendance à se contracter, ce qui entraîne des contraintes résiduelles thermiques opposées dans la zone de soudure.

En revanche, les contraintes résiduelles de compression ont été obtenues afin d'équilibrer les contraintes résiduelles de traction. La valeur maximale des contraintes résiduelles en traction obtenue par la simulation est également presque égale à 43 % de la limite d'élasticité du matériau. Les régions de contraintes résiduelles en compression atteignent 50 % de la limite d'élasticité du matériau dans les régions proches des extrémités qui se traduit par des distorsions. L'état de contraintes est réduit aux extrémités de la plaque raidie, car la dissipation thermique est moins élevée à ce niveau.

Les modèles renforcées avec deux et trois raidisseurs ont présenté des distorsions plus importantes par rapport au modèle avec un raidisseur. Ces distorsions ainsi induites par le procédé peuvent poser des problèmes de tolérances dimensionnelles. [Murugan et al, 2009] [Morin, 2006]



Figure V.17 Courbes de contraintes résiduelles longitudinales S22 dans les plaques raidies

V.2.2.3 Evaluation de la température au niveau du cordon

Pour obtenir l'historique des températures, l'analyse de transfert de chaleur tient compte de la contribution du champ des températures transitoires autant que les propriétés thermophysiques dépendantes de celle-ci. Pour les simulations thermique et structurale de l'opération de soudage, deux incréments de temps différents sont utilisés (Soudage à t = 25 s et refroidissement à t = 60 s). La procédure de soudage implique des gradients thermiques très élevés qui atteignent plus de 1000°C, et pendant le refroidissement cette température diminue jusqu'à une valeur inférieure à 800°C. (Figure V.18)



Figure V.18 Trajectoire de la température NT11 du point situé dans la ligne de fusion au nœud 36 sous ABAQUS

La répartition de la température dans l'ensemble des pièces soudées à différentes distances de la ligne de fusion de la soudure est illustrée dans la figure V.19. La température extrême de 1100°C au point d'application de la soudure diminue en s'éloignant du cordon. On voit clairement que la diminution de la température en fonction de la distance a une tendance non linéaire. La raison est associée au chauffage local de la torche de soudage et la variation non linéaire des propriétés thermiques du matériau avec la température. [Salerno et al, 2018]



Figure V.19 Trajectoire de la température NT11 à des distances éloignées de 3,16 et 32 mm du cordon de soudure sous ABAQUS

V.2.2.4 Analyse thermique des contraintes et des déplacements des plaques raidies sous ABAQUS

Par rapport au milieu en un point de la plaque renforcée et en fonction du passage de la source de chaleur à travers les cordons de soudure (Figure IV.12), on mesure les contraintes

résiduelles par rapport à divers points de passage de la torche. Les histogrammes représentant ces contraintes résiduelles dans les deux directions transversales et longitudinales respectivement 6x (S11) et 6y (S22) sont représentés sur les figures respectives V.20 et V21.

a- Contraintes 6x (S11)

On remarque une concentration des contraintes résiduelles dans la deuxième moitié de la plaque pour les modèles avec un et trois raidisseurs (présence des cordons). Les contraintes dépassent la limite élastique de 275 MPa permettant la plastification du matériau.

Par contre pour la plaque munie de 2 raidisseurs, le point central est moins chargé car il est moins affecté par l'effet de soudage (absence de cordon dans cette zone) (Figure V.20).



Figure V.20 Etat de contraintes thermiques transversales des plaques renforcées par rapport au point central de la plaque sous ABAQUS

b- Contraintes by (S22)

Le point considéré (milieu de la plaque) au début de l'opération de soudage n'est pas affecté par l'effet thermique et par conséquent présente des contraintes résiduelles assez faibles. Ces dernières augmentent dans la 2^{ème} moitié pour atteindre une valeur maximale inférieure à la contrainte élastique (Figure V.21).



Figure V.21 Etat de contraintes thermiques longitudinales des plaques renforcées par rapport au point central de la plaque sous ABAQUS

c- Déplacements Uy (U22)

Par rapport à un point au milieu de la plaque renforcée et en fonction du passage de la source de chaleur au travers les cordons de soudure (Figure IV.12), on mesure les déplacements par rapport à divers points de passage de la torche. Les histogrammes représentant ces déplacements sont représentés sur la figure V.22.

Les résultats ont donné des valeurs faibles dans la 1^{ère} moitié pour les 3 trois types de plaque. Par contre ces valeurs de déplacements ont augmentées dans la seconde moitié.

L'effet de la soudure a eu un effet important sur les valeurs des déplacements verticaux en un point central et ceci pour les 3 modèles dans l'intervalle 600-800 mm. Un déplacement maximal de 19 mm a été obtenu pour la plaque avec 3 raidisseurs.



Figure V.22 Etat de déplacements thermiques des plaques renforcées sous ABAQUS

L'analyse thermique montre que le renfoncement de la plaque munie de trois raidisseurs sous l'effet de la soudure le long de la ligne L_2 et au niveau de la zone centrale pour l'instant t=25s, a présenté un déplacement résiduel U_{max} de 19,06 mm. L'effet thermique cumulé est important particulièrement pour le modèle à trois 03 raidisseurs, il est produit par la fusion du métal d'apport en créant ainsi des zones de risques dans la structure. Par rapport à la valeur extrême et dans la zone centrale, on obtient des chutes de 25,5% et 13.64 % par rapport aux plaques munies d'un et deux raidisseurs respectivement (Figure V.23).



Figure V.23 Etat de déplacements thermiques en cours de soudure des plaques renforcées pendant t=25s

Contrairement au comportement mécanique de la figure V.13,, l'état de déplacement selon le comportement thermique montré sur la figure V.24 montre une concentration des déplacements au centre des plaques raidies.



Figure V.24 Modes de déplacements U2 des plaques raidies lors de l'opération de soudage sous ABAQUS

Au cours du refroidissement l'analyse thermique se résume par la présence d'une température inférieure à 800°C dans l'intervalle de refroidissement (25 à 85 s).

Par ailleurs on note, tout d'abord que les courbes correspondantes conservent la même allure que celle de l'opération de soudage, éventuellement l'ordre de classement de ces courbes mais en présentant des diminutions remarquables dues au rétrécissement approprié des métaux. Ces réductions au milieu de la plaque vis-à-vis du déplacement sont de l'ordre de 95 % pour les trois plaques renforcées.

Aux extrémités, ces réductions deviennent 93.1 % pour la plaque renforcée par 01 raidisseur, ensuite 81.1 % et 56% pour la plaque renforcée par deux 02 et trois 03 raidisseurs respectivement. (Figure V.25)



Figure V.25 Etat de déplacements de l'analyse thermique pendant le refroidissement sous ABAQUS

V.2.3 Etude thermomécanique des plaques raidies sous ABAQUS

. Il est très difficile d'identifier le modèle numérique nécessaire à la mise en données d'une simulation numérique d'assemblage. Or il existe de nombreux procédés d'assemblage et parmi ces derniers, on a le soudage qui est le moyen le plus simple et le plus utilisé. L'intégration des liaisons en simulation numérique est encore assez rare. Elle nécessite un maillage très fin (surconsommation d'éléments finis en plus de la caractérisation de la loi de comportement du matériau utilisé (isotrope ou anisotrope). L'analyse thermomécanique est résumée par le cumul de deux analyses: état présentant la fin du soudage cumulé avec le chargement linéaire.

La simulation en thermomécanique est très compliquée, on présente ainsi une modélisation numérique d'assemblages soudés et sertis avant de faire un point sur les techniques de simplification d'assemblage. La fiabilité du modèle thermomécanique dépend très fortement des champs de température introduits dans le calcul mécanique. Comme on a déjà vu que dans le cadre de cette thèse, on n'intègre pas directement les phénomènes physiques impliqués dans le procédé de soudage à l'arc mais on considère une source thermique équivalente .

Sur la figure V.26 sont représentés des courbes de déplacement U2 selon la ligne L_2 définie précédemment de la plaque raidie avec un seul raidisseur. Le comportement de la plaque chargée d'une valeur de 20N/mm ne peut dans ce cas être considéré uniquement comme un comportement mécanique. Les déplacements dûs à la soudure doivent être cumulés avec ceux obtenus avec le chargement mécanique. La zone centrale donne une différence de 14% tandis que les zones d'extrémités ne sont pratiquement pas affectées. Cette différence représente probablement le déplacement du aux contraintes résiduelles.



Figure V.26 Etat de déplacements de la plaque raidie avec 01 raidisseur sous ABAQUS

De même sur la figure V.27 sont représentés des courbes de déplacement U2 selon la ligne L_2 de la plaque raidie avec 02 raidisseurs. L'écart entre le comportement mécanique et celui thermomécanique représentant 53 % est plus important dans la zone médiane (entre les deux raidisseurs) par rapport au cas précédent. Cela s'explique par la présence de deux sources de chaleur des 2 cordons situés entre les raidisseurs (cumul de l'effet thermique).Les zones d'extrémités sont peu affectées pour atteindre un écart de 4%.



Figure V.27 Etat de déplacements de la plaque raidie avec 02 raidisseurs sous ABAQUS

La figure V.28 associée aux courbes de déplacement U2 de la plaque raidie avec trois 03 raidisseurs, le comportement thermomécanique réel de la section renforcée continue à s'éloigner de celui mécanique par rapport aux deux cas précédents. L'écart dans la zone des trois raidisseurs devient encore plus grand en particulier au milieu pour représenter 62.2 % par rapport au modèle mécanique. Il paraît que cette zone cumule encore plus l'effet thermique,



et cela s'exprime à travers les déplacements résiduels survenus après le refroidissement du spécimen. Alors, les extrémités montrent plus d'affectation, et on trouve un écart (4.2 %).

Figure V.28 Etat de déplacements de l'analyse thermique de la plaque raidie avec trois raidisseurs sous ABAQUS

V.2.4 Hypothèses d'interaction thermomécanique de soudage et étude comparative

Le comportement thermomécanique d'un modèle étudié traite à chaque phase les propriétés élasto-plastique couplée avec écrouissage cinématique linéaire. On suppose que l'état du matériau peut être décrit à l'aide des variables suivantes : la déformation totale (ε), la déformation plastique locale (ε_p), et la variable métallurgique $d\varepsilon^{pt}$ et $d\varepsilon^{vp}$. En prévoyant un couplage entre la déformation élastique, plastique et thermique. [Wang et al, 2015], [Caprace et al, 2017]

$$d\varepsilon^{th-m} = d\varepsilon^{el} + d\varepsilon^{p} + d\varepsilon^{th} + d\varepsilon^{vp} + d\varepsilon^{pt}$$
(V.1)

Avec :

 $d \varepsilon^{th-m}$: Les déformations thermomécaniques

 $d\varepsilon^{el}$: Les déformations élastiques

 $d \varepsilon^{th}$: Les déformations thermiques résiduelles dues à la soudure

 $d\varepsilon^{pt}$: Les déformations plastiques de transformations

 $d\varepsilon^{vp}$: Les déformations viscoplastiques

Par simplification on néglige l'effet des transformations métallurgiques et on peut écrire :

$$\mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{th}-\mathrm{m}} = \mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{el}} + \mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{p}} + \mathbf{d}\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{th}}$$
(V.2)

Les figures V.29, V.30 et V.31 repésentent l'état de déformation de la plaque munie d'un, deux, et trois raidisseurs en comparant entre trois différents modes d'analyse à savoir : mécanique, thermomécanique et analytique. Le dernier mode est basé sur la formule analytique précédente V.2.

• Cas avec 01 raidisseur

Pour une charge linéaire de 20 N/mm et dans le cas d'un seul raidisseur, la figure V.29 montre que les trois modes d'analyse suivent la même allure (-0.000153 ; 0,0014). Les deux comportements thermomécaniques et analytique sont compatibles le long de cette plaque sauf au milieu où le mode analytique est plus dominant (ε_{yy} = -0,000153), avec une différence de 44% par rapport au comportement mécanique et cela est dû à l'effet du moyen d'assemblage qui est la soudure. En plus les déformations aux extrémités des deux modes sont presque similaires (ε_{yy} = 0.0014). Une distinction au niveau des extrémités entre modèle mécanique et thermomécanique de 15%. Donc le calcul mécanique seul ne suffit pas à représenter l'état de déformation réel lors d'un assemblage soudé. [Wang et al, 2015]



Figure V.29 Etat de déformation de la plaque renforcée par un 01 seul raidisseur sous ABAQUS

• Cas avec 02 raidisseurs

Pour le même chargement de 20 N/mm et dans le cas de deux 02 raidisseurs la figure V.30 montre que les trois modes d'analyse suivent la même allure. Les trois comportements mécanique, thermomécanique et analytique sont presque confondues sur toute la portée de la plaque (-0,00036; 0,0001); il est à noter qu'au niveau des raidisseurs on remarque un écart de (33 %) par rapport au modèle mécanique, la supériorité est associée à la courbe analytique dans la zone des raidisseurs (ε_{yy} = 0.00036). La différence entre les divers comportements est due surment à l'état de déformation résiduelle résultante de l'opération de soudage qui n'est pas prise en considération particulièrement pour le modèle mécanique.



Figure V.30 Etat de déformation de la plaque renforcée avec 02 raidisseurs sous ABAQUS

• Cas avec 03 raidisseurs

Pour le même chargement toujours de (20 N/mm) les plaques de la figure V.31 présentent que les trois modes d'analyse conservent toujours la même trajectoire. Les trois comportements mécanique, thermomécanique et analytique sont plus confondues sur toute la portée de la plaque (-0,00012 ; 0,00087), les écarts deviennent plus faiblqes (07%) au niveau des extrémités.

Il est à noter qu'au niveau des raidisseurs on a un petit écart avec une supériorité associée à la courbe analytique dans la zone des raidisseurs ($\varepsilon_{yy}=0.000124$). La différence entre les divers comportement est due certainement à l'état de déformations résiduelles résultantes de l'opération de soudage qui n'est pas pris en considération particulièrement pour le modèle mécanique.



Figure V.31 Etat de déformation de la plaque renforcée avec 03 raidisseurs sous ABAQUS Dans la zone centrale, la dimiution des déformations est influencée par l'effet de la présence des raidisseurs. Or, dans les extrémités où les déformations résiduelles de soudage sont importantes grâce à la distorsion qui est plus importante dans le modèle avec 03 raidisseurs. [Murugan et al, 2009], [Morin, 2006].

V.3 Etude comparative des plaques avec et sans renforcement V.3.1 Cas de la plaque non raidie

Pour la plaque non raidie soumise à un chargement statique linéaire uniformément réparti évoluant en intensité, les résultats du calcul numérique ont été comparés avec ceux obtenus expérimentalement. On remarque que la zone médiane est la plus affectée (figure **V.32**).



Figure V.32 Mode de déformation de la plaque non renforcée

La mesure des flèches à l'aide de comparateurs placés aux 2 extrémités a donné un même comportement signe de symétrie du chargement (Figure **V.33**).

La courbe numérique charge-flèche a la même allure que celles obtenues expérimentalement.

Un déplacement maximal de 101 mm correspond à une charge théorique de 19.2 N/mm et une charge expérimentale de 17 N/mm. Une différence de 11% est due aux imperfections géomètriques et de dressage.



Figure V.33 Courbes expérimentales et numériques (charge -flèche) de la plaque non raidie

V.3.2 Cas de la plaque raidie avec 01 raidisseur

Pour la plaque raidie avec 01 raidisseur et soumise à un chargement statique linéaire uniformément réparti évoluant en intensité jusqu'à la charge maximale, les résultats du calcul numérique prenant en compte l'analyse thermomécanique ont été comparés avec ceux obtenus expérimentalement.

Dans une 1^{ère} phase la plaque a eu un comportement élastique et l'analyse théorique a donné une charge maximale de 47.5 N/mm. Par contre lors de l'essai, la charge maximale a été de 32 N/mm correspondant à une flèche maximale de 54 mm.

Une différence de 32.6 % entre les 2 charges maximales est due à notre avis aux contraintes résiduelles cumulées par la plaque et provenant de l'effet de la soudure (Figure V.35).



Figure V.34 Mode de déformation de la plaque renforcée avec un seul raidisseur



Figure V.35 Courbes charge – flèche de la plaque renforcée avec 01 raidisseur

V.3.3 Cas de la plaque raidie avec 02 raidisseurs

De même pour la plaque raidie avec 02 raidisseurs (Figure V.36) et soumise à un chargement statique linéaire uniformément réparti évoluant en intensité jusqu'à la charge maximale, les résultats du calcul numérique prenant en compte l'analyse thermomécanique

ont été comparés avec ceux obtenus expérimentalement. On observe clairement que les grands déplacements, position des deux comparateurs, se trouvent toujours aux extrémités par rapport à la zone raidie.



Figure V.36 Mode de déformation de la plaque renforcée par deux 02 raidisseurs

Les courbes charge-flèche représentées sur la figure V.37 montrent une similitude de comportement, atteignant une charge maximale de 21.87 N/mm correspondant à une flèche maximale de 7,88 mm.



Figure V.37 Courbes charge – flèche de la plaque renforcée avec 02 raidisseurs

V.3.4 Cas de la plaque raidie avec 03 raidisseurs

Pour la plaque raidie avec 03 raidisseurs et soumise à un chargement statique linéaire uniformément réparti évoluant en intensité jusqu'à la charge maximale, les résultats du calcul numérique prenant en compte l'analyse thermomécanique ont été comparés avec ceux obtenus expérimentalement

Les valeurs de flèche obtenus par les comparateurs 01 et 02 placés aux deux extrémités ont montré une bonne corrélation entre les résultats numériques et ceux expérimentaux. La figure V.38 montre l'isographe de déformations obtenues sous ABAQUS



Figure V.38 Mode de déformation de la plaque renforcée avec 03 raidisseurs

Sur la figure V.39 est représenté les diagrammes Charge – flèche de la plaque avec 03 raidisseurs. Une coincidence par rapport à la charge maximale de 36,25 N/mm correspondant à une flèche de 8 mm est obtenue.



Figure V.39 Courbes charge – flèche de la plaque renforcée avec 03 raidisseurs **V.4 Etude expérimentale de la déformée pour les plaques avec et sans renforcement**

La charge extrême pour la plaque non raidie est de 17,5 N/mm et un déplacement majore qui lui correspond de 101 mm. Pour la même charge on mesure expérimentalement une flèche de 18.4, 3.52, 1.15 mm et cela pour les plaques raidies que ce soit avec un 01, deux 02 et trois 03 raidisseurs respectivement. Autrement dit on calcule un pourcentage décroissant vis-à-vis des déplacements par rapport à la plaque non raidie de 81, 96, 98 % aux plaques de un 01, deux 02 et trois 03 raidisseurs successivement. En fait, ce qui montre clairement le rôle bénéfique et primordial des raidisseurs exprimé au gain de rigidité avec la minimisation des

déplacements et l'augmentation de l'étendue de l'effort appliqué, ce qui améliore sans doute sa résistance (Figure V.40).

Le renforcement par matériaux composites est largement utilisé dans le renforcement des structures métalliques ce qui est énormément traité dans la littérature, on cite [Draidi, 2005] ; [Benzaid, 2010] ; [Louetri, 2016] ; [Zeng et al, 2018] ; [Keykha, 2019], mais cette technique a de grands inconvénients vis-à-vis le décollement des couches de fibre de carbone. Contrairement durant l'essai de flexion, les cordons ont maintenu leurs résistances, on note aucune séparation entre les raidisseurs et les plaques.



Figure V.40 Etat de déplacement des plaques

V.5 Etat de déformation-contrainte des plaques d'essais

• Plaque non renforcée

Pour la plaque non renforcée les deux modèles montrent une bonne corrélation entre les résultats donnés par la jauge 1 et ceux trouvés numériquement. Lors de l'essai, au début du chargement la plaque non renforcée a présenté un comportement élastique dont les déformations sont proportionnelles aux efforts appliqués. Une plastification du matériau est obtenue pour des valeurs supérieures. La plasticité se traduit par la dissipation de l'énergie au cours de la déformation: l'énergie mécanique est transformée en énergie thermique, conduisant à l'irréversibilité du comportement du matériau ; ce mécanisme traduit également la ductilité du matériau qui permet aux métaux de subir des allongements significatifs avant de rompre. Les deux modèles présentent la même déformation plastique à la fin de l'essai ($\epsilon_{p=}$ 50×10⁻⁴) (Figure V.41).



Figure V.41 Etat de contrainte - déformation de la plaque non renforcée

• Plaques renforcées

La figure V.42 représente l'état de charge – déformation des plaques renforcées avec 1, 2 et 3 raidisseurs.

Expérimentalement les jauges sont réquisitionnées pour la capture des déformations en différents endroits tels que les jauges J2, J3 et J5 qui ont été positionnés au voisinage des cordons de soudure mais à des emplacements différents le long de la plaque. Elles sont disposées à des distances de 390mm, 274mm et 391 mm selon la plaque. La jauge J4 se trouve dans la zone centrale c-à-d à 400mm entre 2 raidisseurs, par contre la jauge J6 est à une distance de 299 mm.

✓ Dans l'intervalle de charge 0-25 N/mm, la plaque avec 01 raidisseur a montré des déformations de compression accumulées lors de l'opération de soudage des raidisseurs. Suite à l'accroissement de la charge de flexion, ces déformations deviennent positives (traction) à partir d'une valeur de charge égale à 25N/mm (Figure V.42(a)).

 \checkmark Sur la figure V.42.(b) et dans l'intervalle de charge 0-14 N/mm, les déformations obtenues expérimentalement au niveau des jauges J3 et J4 de la plaque avec 02 raidisseurs ont des valeurs similaires. L'analyse numérique dans la zone de la jauge 3 a donné une bonne corrélation avec les résultats obtenus expérimentalement. Par contre les déformations dans la zone 4 ont présenté une différence maximale de 60%.

A partir de la valeur de charge égale à 17,5 N/mm, la plaque avec 02 raidisseurs se plastifie et présente un comportement similaire avec celui obtenu numériquement.



Figure V.42 Etat de charge - déformation des plaques renforcées (a) 01 raidisseur, (b) 02 raidisseurs, (c) 03 raidisseurs

 \checkmark La figure V.42 (c) relative à la plaque avec 3 raidisseurs que les modèles suivent les mêmes allures avec une rigidité très remarquable lors de l'essai dû à l'influence des raidisseurs surtout dans la zone d'emplacement de la jauge 5. Dans cette zone on trouve une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et numériques.

La zone d'emplacement de la jauge 6 est la plus affectée par rapport celle de la jauge 5 et cela se voit clairement dans les courbes numériques au-delà d'une charge de 10 N/mm . Cela s'explique par l'influence des deux 02 cordons de soudure sur la zone d'emplacement de la jauge 6. Un écart est remarquable expérimentalement entre la jauge 5 et 6 par rapport au modèle numérique de 47 %, et en contrepartie la fiabilité des modèles se voit clairement dans cette étude comparative.

V.6 Conclusions

Les structures en acier peuvent normalement subir divers types de dommages en service. Certains types de dommages tels que la corrosion et la fissuration par fatigue sont liés à l'âge, mais d'autres sont plus susceptibles d'être des dommages mécaniques causés par une charge ou un choc accidentel. Les dommages structurels peuvent réduire la capacité de charge de la structure et entraîner une défaillance catastrophique. Une fois les dommages structurels détectés, l'exploitant devra juger si les réparations et l'entretien nécessaires doivent être effectués. En fait, la réparation par le renouvellement d'une pièce de structure endommagée est en général complexe et coûteuse. C'est pour cela le renforcement par l'augmentation de section reste une solution pratique et économique. Les résultats réels de l'étude numérique de renforcement ont été validés par des résultats expérimentaux où il a été trouvé une très bonne concordance.

On voit clairement que l'effet thermique ne peut pas être négligé ,en plus de la présence d'une révolution au niveau des procédés de soudage qui a tendance à minimiser ces contraintes thermiques. On peut dire que nos modèles expérimentaux élaborés soigneusement au laboratoire, ont réussi à absorber ou dépasser l'effet négatif du moyen d'assemblage par soudage. Ce qui est finalement expliqué par l'augmentation de la rigidité bien définie aux courbes expérimentales confirmées par une fiable modélisation numérique.