

CHAPITRE 5

VALIDATION DU MODÈLE

Afin de valider les résultats de l'analyse par éléments finis, un essai de soudure a été réalisé par une équipe de l'Institut de recherche en électricité du Québec (IREQ). Pour assurer la plus grande précision possible des résultats, la soudure a été réalisée à l'aide du robot « Scompi », technologie développée à l'IREQ. L'essai consiste en un dépôt de soudure à la surface d'une plaque d'acier A516 simplement supportée. La figure 43 montre le montage utilisé. Quinze thermocouples ont été disposés dans des trous sous la plaque à des profondeurs variables. Deux séries de six rosettes à 45° ont été placées sur le dessus de la plaque, à une distance du centre du cordon de soudure variant de 14 à 40 mm. La position des points d'acquisition est présentée dans les tableaux I et II, relativement au point d'origine de la plaque qui apparaît sur la figure 44. Les paramètres de la soudure sont donnés au tableau III.



Figure 43 Montage expérimental

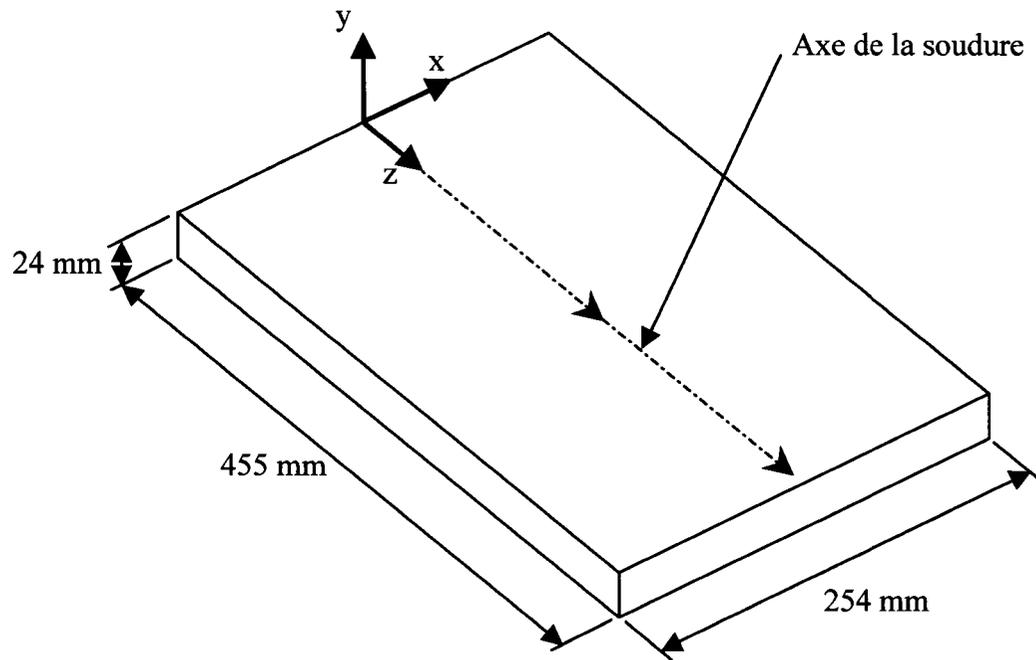


Figure 44 Dimensions de la plaque

Tableau I
Position des thermocouples

| Thermocouple | Position X mm | Position Y mm | Position Z mm |
|--------------|------------------|------------------|------------------|
| T1 | 5.9 | -2.14 | 150.07 |
| T2 | 7.9 | -2.54 | 169.82 |
| T3 | 10 | -2.11 | 189.98 |
| T4 | 11.9 | -2.36 | 209.97 |
| T5 | 13.9 | -2.11 | 230.07 |
| T6 | 16.7 | -2.62 | 250 |
| T7 | 19.9 | -2.14 | 200.07 |
| T8 | 25 | -2.54 | 220.08 |
| T9 | 29.9 | -2.67 | 240.21 |

Tableau I (suite)

| Thermocouple | Position X mm | Position Y mm | Position Z mm |
|--------------|------------------|------------------|------------------|
| T10 | 39.8 | -2.11 | 259.95 |
| T11 | 0 | -5.13 | 299.76 |
| T12 | 0 | -6.66 | 319.83 |
| T13 | 0 | -7.62 | 339.8 |
| T14 | 0 | -8.64 | 359.72 |
| T15 | 0 | -10.09 | 379.98 |

Tableau II

Position des jauges de déformation

| | Rosette | Position X mm | Position Y mm | Position Z mm |
|-----------|---------|------------------|------------------|------------------|
| Section 1 | R1 | -14 | 0 | 270 |
| | R2 | -17 | 0 | 250 |
| | R3 | -20 | 0 | 200 |
| | R4 | -25 | 0 | 220 |
| | R5 | -30 | 0 | 240 |
| | R6 | -40 | 0 | 260 |
| Section 2 | R7 | -14 | 0 | 170 |
| | R8 | -17 | 0 | 150 |
| | R9 | -20 | 0 | 100 |
| | R10 | -25 | 0 | 120 |
| | R11 | -30 | 0 | 140 |
| | R12 | -40 | 0 | 160 |

Tableau III
Paramètres de soudage

| | |
|---------|----------|
| Tension | 28,5 V |
| Courant | 255 A |
| Vitesse | 6 mm / s |

5.1 Modèle des éléments finis

La taille et la géométrie du maillage utilisé sont celles obtenues à la suite des analyses de convergence du chapitre 4. Le modèle de la figure 45 contient 73 208 éléments et 85 937 nœuds. Les paramètres du double ellipsoïde sont fournis au tableau IV, et les paramètres de la simulation sont donnés au tableau V

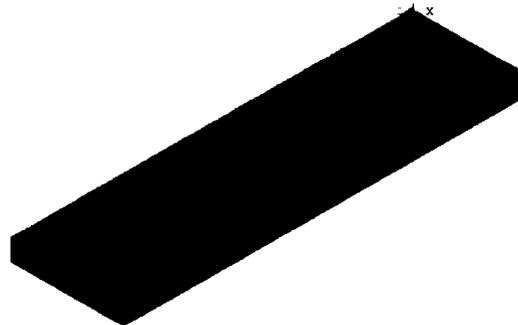


Figure 45 Modèle des éléments finis

Tableau IV
Paramètres du double ellipsoïde

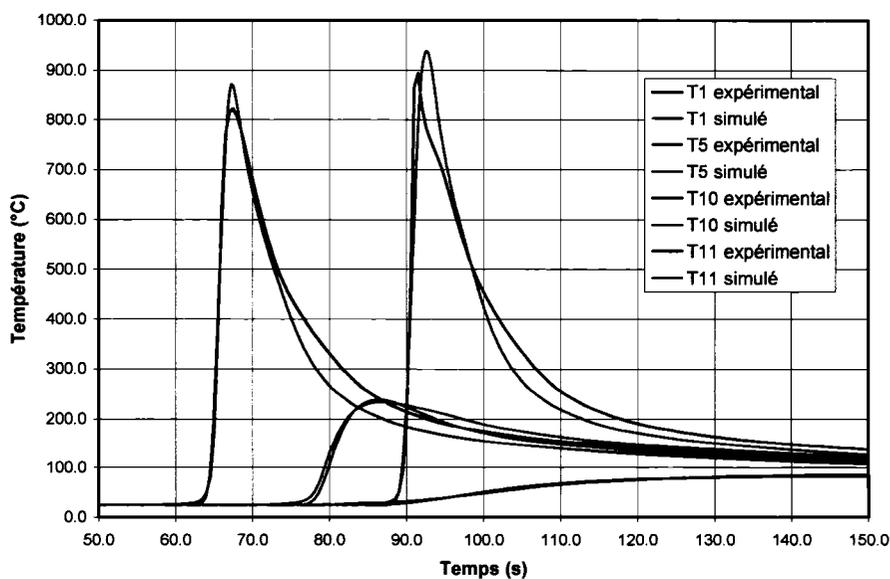
| | |
|-------|-------|
| a | 7 mm |
| b | 4 mm |
| c_f | 7 mm |
| c_r | 14 mm |
| f_f | 0,6 |
| f_r | 1,4 |

Tableau V
Paramètres de la simulation

| | |
|---------------------------------|--------------|
| Facteur de rendement (η) | 75 % |
| Δt (thermique) | 0,2 secondes |
| k_t (thermique) | 0,05 |
| Δt (structural) | 0,4 secondes |
| k_t (structural) | 0,10 |

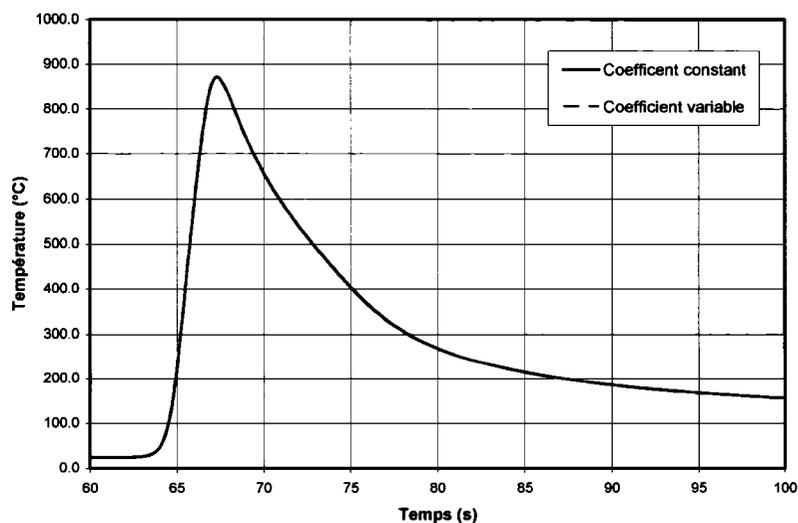
5.2 Résultats thermiques

La comparaison des profils de température à quatre thermocouples obtenus par le modèle numérique avec les résultats expérimentaux est effectuée sur le graphique 32. Toutes les autres courbes sont présentées à l'annexe 3.

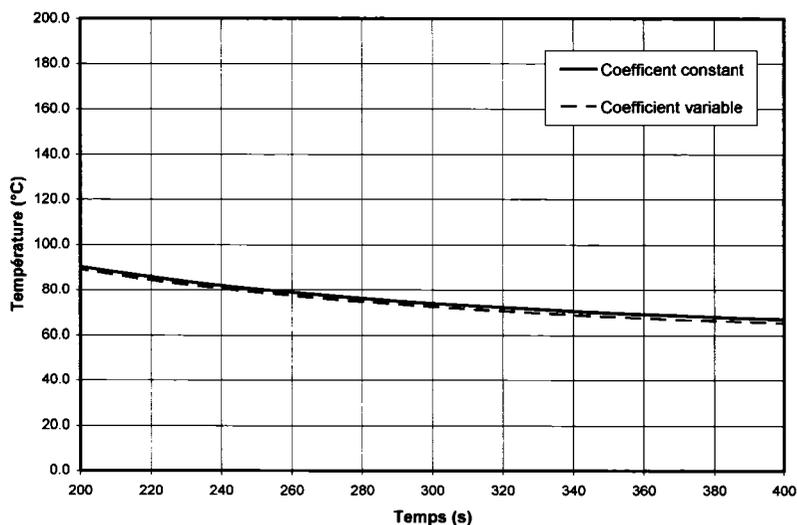


Graphique 32 Comparaison des profils de température

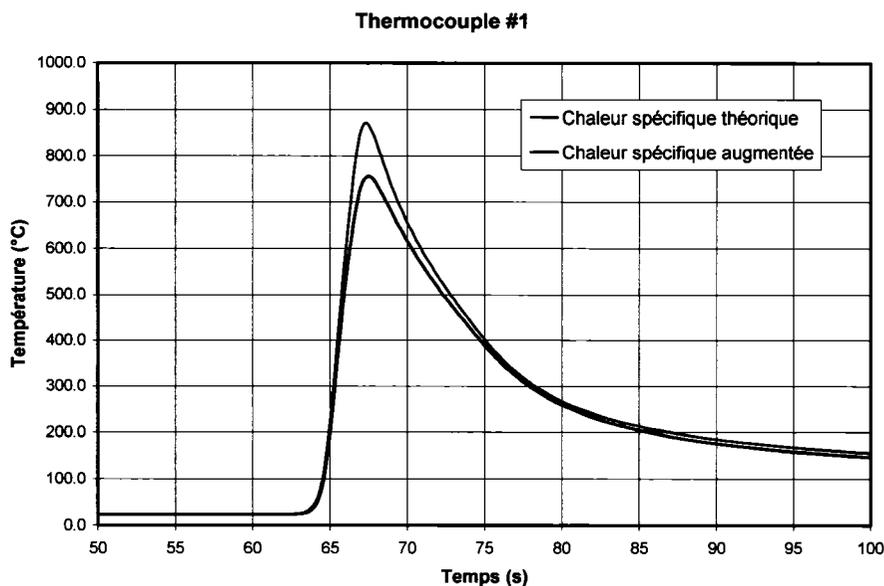
La première différence observée est la vitesse de refroidissement qui est beaucoup plus grande pour les résultats numériques. Un facteur qui pourrait expliquer ce problème est un coefficient de perte de chaleur dans l'atmosphère trop élevé. Afin de vérifier ce facteur, une simulation a été réalisée en imposant un coefficient de perte de chaleur constant et égal à $5 \text{ W / m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Les deux simulations sont comparées entre elles pour le thermocouple #1, dans une zone où le coefficient de perte de chaleur varie normalement entre 30 et $90 \text{ W / m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Les graphiques 33 et 34 démontrent qu'il n'y a pratiquement pas de différence entre les deux simulations, sauf lorsque la vitesse de refroidissement devient très faible. C'est donc dire qu'au début du refroidissement, la perte de chaleur se produit principalement par diffusion à l'intérieur du matériau. Le refroidissement trop rapide pourrait donc être dû au manque de précision des propriétés du matériau. Deux propriétés du matériau peuvent être la cause du refroidissement trop rapide : la chaleur spécifique et la conductivité thermique. La chaleur spécifique représente l'énergie nécessaire pour faire varier la température du matériau de un degré celsius. Logiquement, une chaleur spécifique trop faible ferait donc en sorte que le matériau se refroidisse plus rapidement. Le graphique 35 montre la comparaison entre le profil de température obtenu précédemment avec les résultats acquis en augmentant la chaleur spécifique de 15 %.



Graphique 33 Vérification du coefficient de perte de chaleur (début du refroidissement)



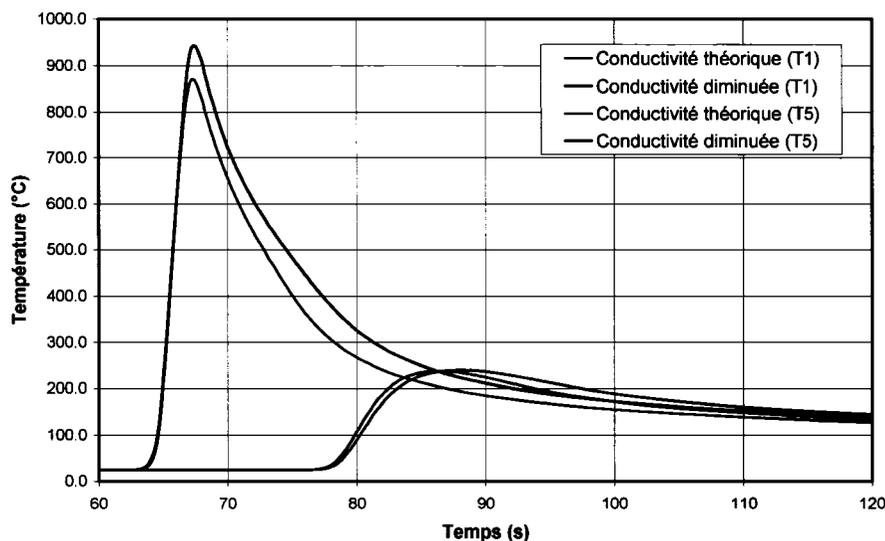
Graphique 34 Vérification du coefficient de perte de chaleur (pendant le refroidissement)



Graphique 35 Résultats des températures avec une chaleur spécifique augmentée

La principale différence entre les deux courbes est la température maximale atteinte, ce qui est tout à fait normal puisqu'il faut désormais plus d'énergie pour faire augmenter la température du matériau. On peut également noter une légère baisse de la vitesse de refroidissement, baisse qui n'est cependant pas très significative.

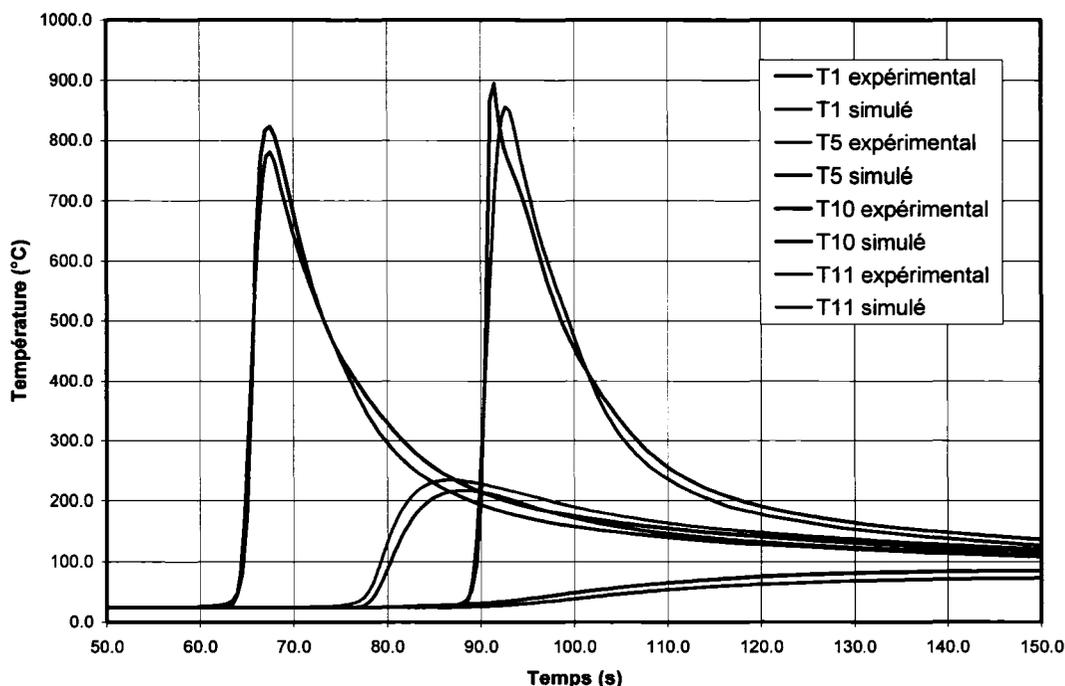
Quant à elle, la conductivité représente la facilité avec laquelle la chaleur se propage à l'intérieur d'un volume. Une conductivité trop élevée ferait donc également en sorte que le matériau refroidisse plus rapidement. Le graphique 36 montre les effets d'une diminution de 20 % de la conductivité sur les résultats aux thermocouples #1 et #5. On remarque que le refroidissement est effectivement plus lent, mais que la température atteinte au premier thermocouple est beaucoup plus élevée. Il serait donc possible d'atteindre la bonne vitesse de refroidissement en diminuant la conductivité thermique, pour ensuite ajuster les températures maximales atteintes en modifiant la chaleur spécifique.



Graphique 36 Résultats des températures avec une conductivité thermique diminuée

Les propriétés thermiques de l'acier A516 ont été déterminées à partir de données disponibles dans la littérature pour les aciers à faible teneur en carbone. Il serait préférable d'effectuer des essais expérimentaux afin de déterminer précisément ces propriétés. Puisque aucun essai n'a été réalisé pour les propriétés thermiques, elles ont été ajustées afin de correspondre à l'essai de soudage : la conductivité a été réduite de 15 % et la chaleur spécifique a été augmentée de 15 %. Bien que cette correction semble importante, elle n'est ajoutée qu'afin de démontrer l'influence des propriétés thermiques sur l'allure des courbes. Les différences obtenues au niveau de la vitesse de

refroidissement et des températures maximales atteintes peuvent s'expliquer également par l'utilisation d'un coefficient de convection et radiation combiné, ainsi que par le fait que le métal d'apport n'est pas modélisé. Le graphique 37 présente les résultats obtenus. Toutes les courbes sont présentées en annexe 3.

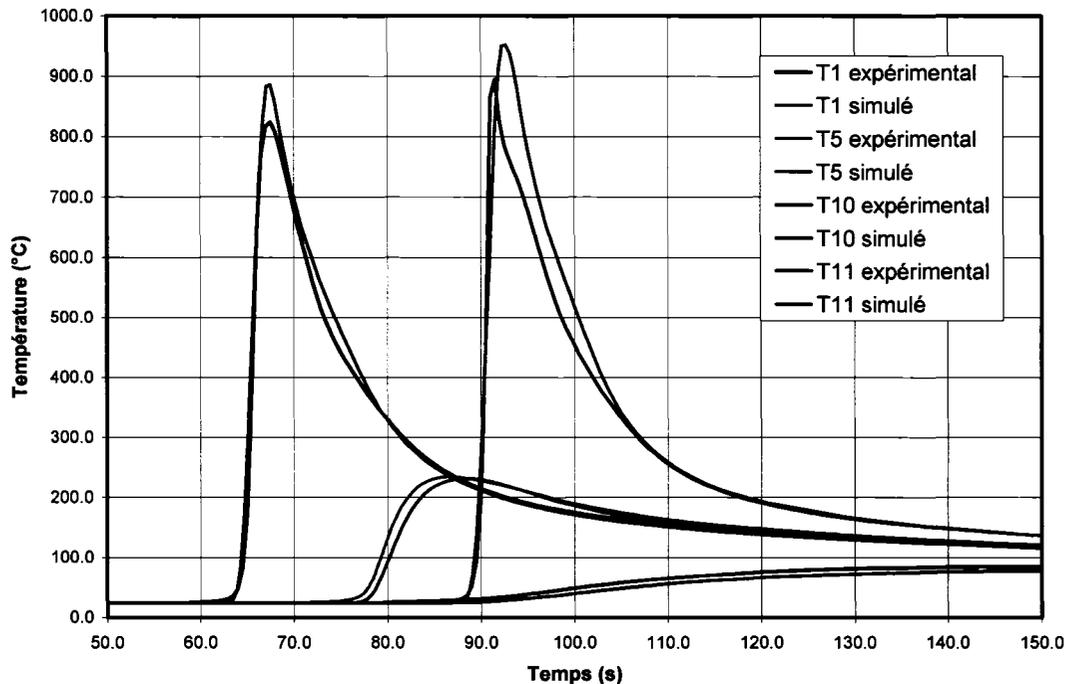


Graphique 37 Résultats des températures avec les propriétés thermiques ajustées

5.2.1 Ajustement du facteur de rendement

Le facteur de rendement est ajusté en analysant la température de thermalisation de la plaque. La thermalisation signifie que la température est uniforme dans la plaque. Dans le cas présent, la thermalisation est considérée atteinte lorsque la différence maximale de température entre les thermocouples est de 1°C. Les résultats expérimentaux démontrent que la thermalisation est atteinte à 58,5°C, alors que les résultats de la simulation donnent une thermalisation à 56°C. Le facteur de rendement utilisé lors de la simulation est de 75 % ; il doit être augmenté pour que la bonne quantité de chaleur soit transmise à la plaque. Un facteur de rendement de 82 % permet d'obtenir une température de thermalisation de 58,7 °C. Les profils de température obtenus à l'aide de ce facteur de

rendement sont présentés sur le graphique 38. Toutes les courbes sont présentées à l'annexe 3.

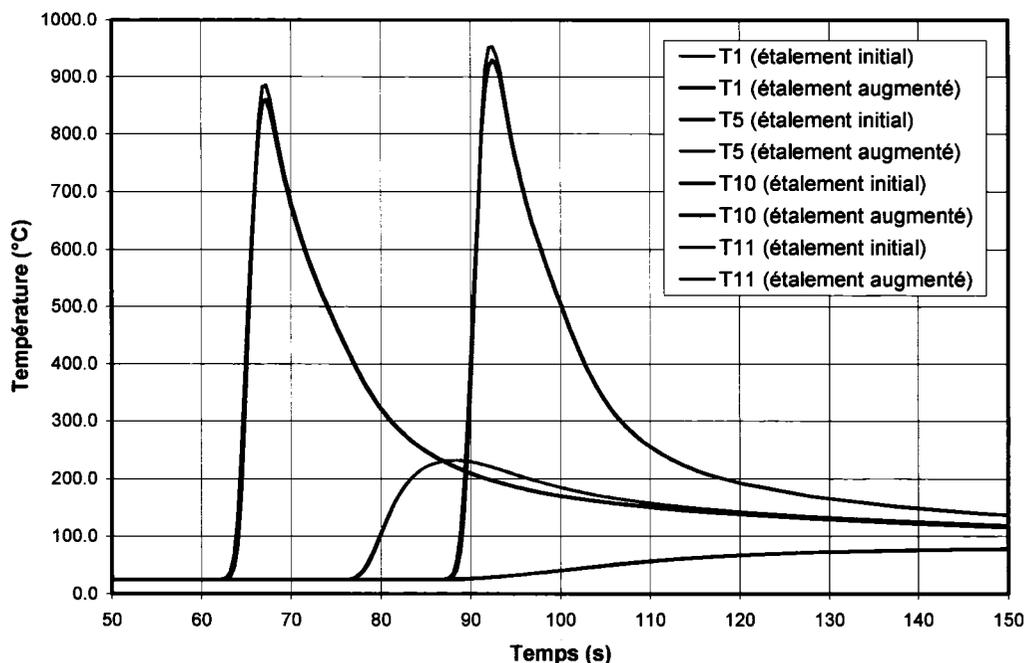


Graphique 38 Résultats des températures avec le facteur de rendement ajusté

5.2.2 Ajustement des dimensions du double ellipsoïde

Les dimensions du double ellipsoïde présentées au tableau IV ont été recommandées par l'équipe de chercheurs de l'IREQ, suite aux observations effectuées en laboratoire et aux simulations numériques subséquentes. Afin de vérifier la justesse de ces dimensions, deux simulations supplémentaires ont été effectuées, en modifiant les dimensions du double ellipsoïde, afin d'améliorer les résultats obtenus. La variation de ces dimensions ne devrait modifier en théorie que les résultats près de la soudure. Les profils de température loin de la soudure ne sont influencés que par la quantité de chaleur appliquée. Les résultats obtenus précédemment démontrent que la température des thermocouples les plus près de la soudure obtenue par la simulation est supérieure à celle atteinte lors de l'expérimentation. Afin de réduire cette température, une première simulation, dont les résultats sont présentés sur le graphique 39, présente les effets d'une

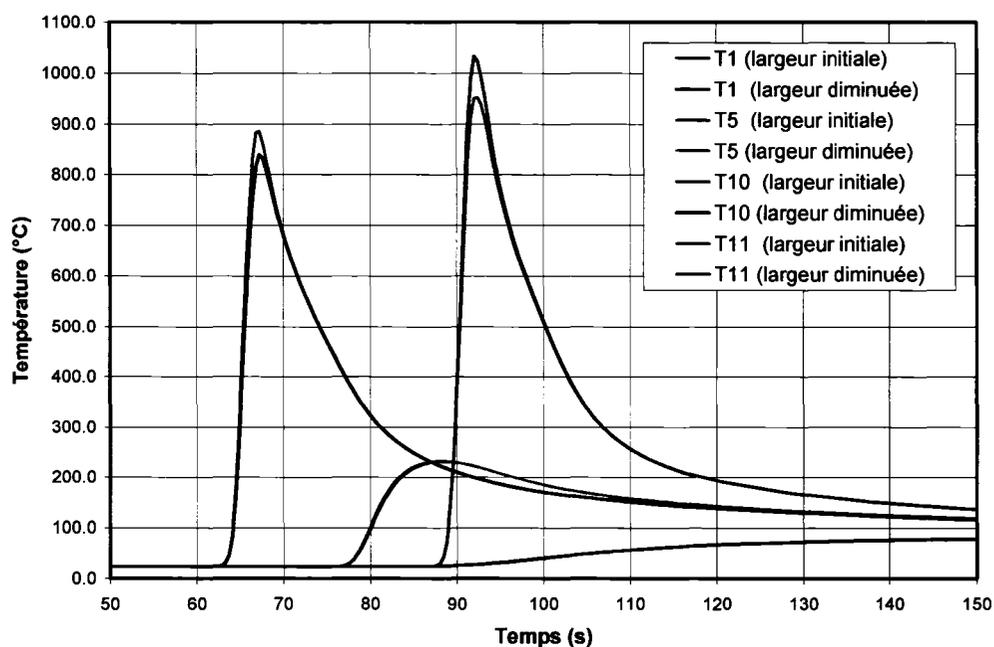
augmentation de l'étalement du double ellipsoïde : le paramètre c_f passe de 7 mm à 8 mm et c_r de 14 mm à 16 mm. On remarque que la température des thermocouples les plus près de la soudure a diminué, alors que les résultats des autres thermocouples sont demeurés identiques.



Graphique 39 Résultats des températures avec un étalement de la source augmenté

La deuxième simulation a été menée en réduisant la largeur du double ellipsoïde (paramètre a), qui passe de 7 à 6 mm. Les résultats présentés sur le graphique 40 démontrent que la température du thermocouple #1 a effectivement diminué, mais que la température du thermocouple #11 a augmenté substantiellement. En réduisant la taille du double ellipsoïde, une plus grande quantité de chaleur est appliquée au centre de la plaque, endroit où est situé le thermocouple #11 ; il est donc normal que sa température ait augmenté. La méthode la plus efficace pour réduire la température des thermocouples près de la soudure est donc d'augmenter l'étalement du double ellipsoïde. Il faut noter qu'en théorie, une réduction de la pénétration (paramètre b) aurait dû permettre de réduire la température du thermocouple #11. Cependant l'utilisation d'une pénétration

trop faible a engendré des problèmes au niveau de la convergence des résultats ; la pénétration a donc été conservée à 4 mm.



Graphique 40 Résultats des températures avec la largeur de la source diminuée

Le tableau VI présente la température maximale atteinte par chaque thermocouple, obtenue avec les dimensions optimisées du double ellipsoïde, soit une largeur (a) de 7 mm, un étalement de 27 mm ($c_f = 9$ mm, $c_r = 18$ mm) et une pénétration (b) de 4 mm. L'écart moyen entre les résultats expérimentaux et numériques, qui est de 6,3 %, démontre que la simulation a permis de reproduire fidèlement le profil thermique de la plaque pendant le soudage. Le graphique 41 présente les courbes profil thermique pendant le soudage. Les résultats de tous les thermocouples sont présentés à l'annexe 3.

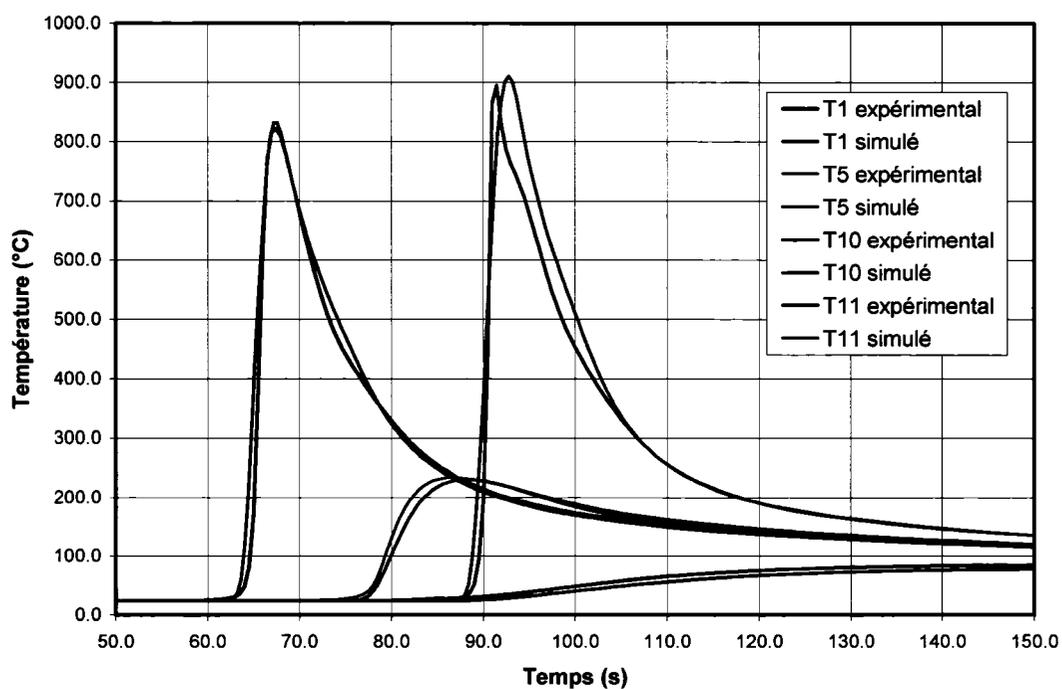
Tableau VI

Température maximale atteinte par chaque thermocouple

| Thermocouple | Expérimental | MEF | Écart |
|--------------|--------------|-------|-------|
| T1 | 823,0 | 832,2 | 1,1% |
| T2 | 644,4 | 500,5 | 22,3% |

Tableau VI (suite)

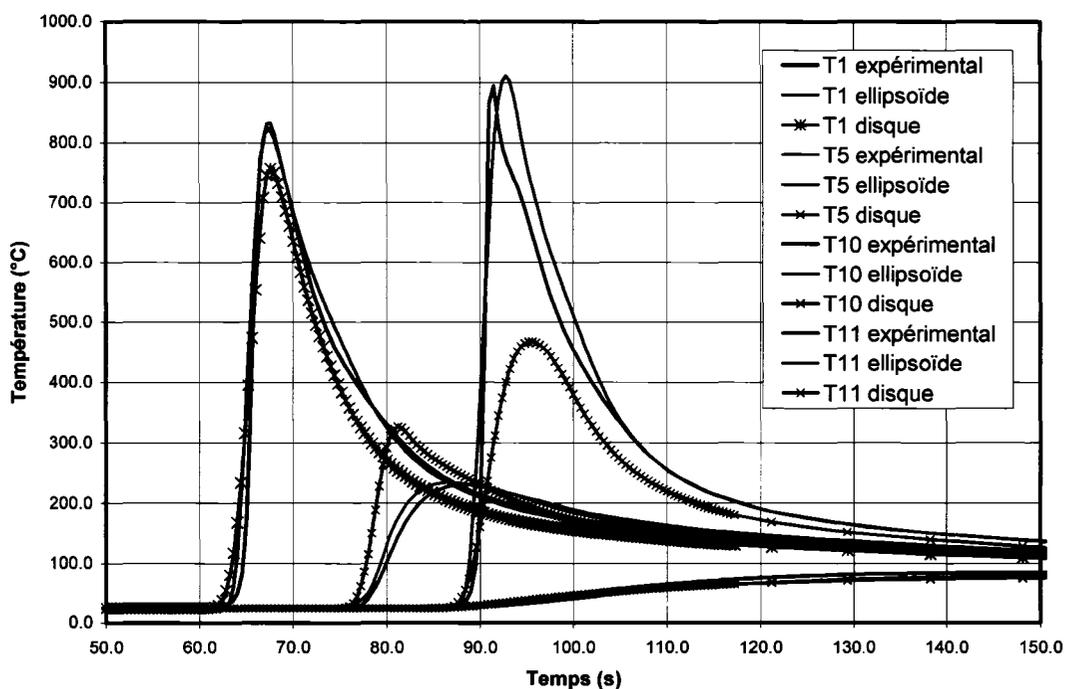
| Thermocouple | Expérimental | MEF | Écart |
|--------------|--------------|-------|-------|
| T3 | 399,6 | 365,1 | 8,6% |
| T4 | 303,7 | 285,0 | 6,2% |
| T5 | 234,3 | 231,1 | 1,4% |
| T6 | 182,5 | 181,0 | 0,8% |
| T7 | 150,9 | 145,1 | 3,8% |
| T8 | 119,0 | 112,9 | 5,1% |
| T9 | 103,8 | 97,6 | 6,0% |
| T10 | 85,1 | 79,2 | 6,9% |
| T11 | 894,5 | 910,8 | 1,8% |
| T12 | 606,3 | 610,7 | 0,7% |
| T13 | 510,7 | 509,7 | 0,2% |
| T14 | 369,5 | 432,7 | 17,1% |
| T15 | 314,0 | 353,0 | 12,4% |
| Écart moyen | | | 6,3% |



Graphique 41 Résultats finaux des profils de température

5.2.3 Comparaison avec le modèle du disque

Le modèle du disque, présenté à la section 2.1.1, est maintenant comparé au modèle du double ellipsoïde. Les résultats sont comparés à ceux obtenus à la section précédente ; les paramètres de soudure et le maillage utilisés sont donc les mêmes. La taille du disque a été déterminée en utilisant la même surface que la surface elliptique définie par les paramètres a , c_f et c_r , pour un rayon de 10 mm. Le graphique 42 montre que les résultats sont beaucoup moins précis pour la méthode du disque comparativement à la méthode du double ellipsoïde.



Graphique 42 Résultats du modèle du disque

Le profil de température au thermocouple #1, qui est près de la surface, est relativement près des résultats expérimentaux. Cependant, les résultats obtenus au thermocouple #11, qui est placé plus loin de la surface, sont beaucoup plus loin de la réalité. Cette différence est probablement due au fait que la chaleur, qui est appliquée uniquement à la

surface de la plaque, se propage facilement dans toutes les directions, alors que le double ellipsoïde, en appliquant la chaleur jusqu'à une certaine profondeur, impose un plus grand transfert de chaleur à travers l'épaisseur. Tel que prévu, les résultats au thermocouple T10, qui est loin de la soudure, sont similaires pour les deux simulations : le profil de température dans cette zone est donc bien régi principalement par la quantité de chaleur appliquée. En définitive, la méthode du disque n'est pas appropriée pour la modélisation du procédé de soudage GMAW ; cette méthode serait probablement plus efficace pour la modélisation de la soudure oxyacétylénique, où la chaleur est réellement appliquée à la surface par une flamme.

5.3 Résultats structuraux

La simulation des contraintes résiduelles utilise le maillage de l'analyse thermique dont les éléments ont été transformés en éléments structuraux. La figure 46 montre les conditions frontières du modèle. Les blocages au plan $x = 0$ représentent la condition de symétrie. Les autres blocages représentent le cas d'une plaque simplement supportée.

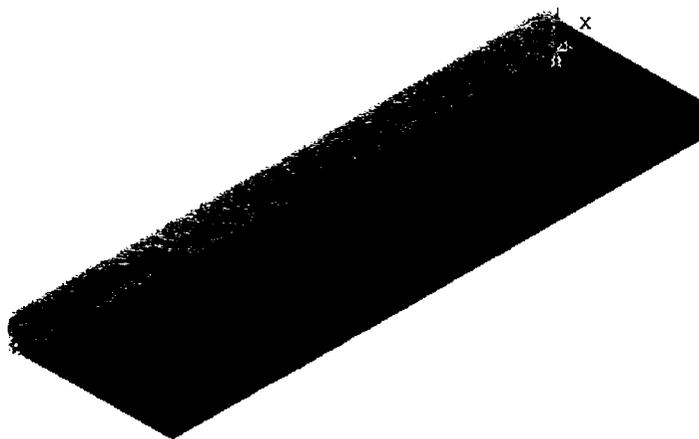
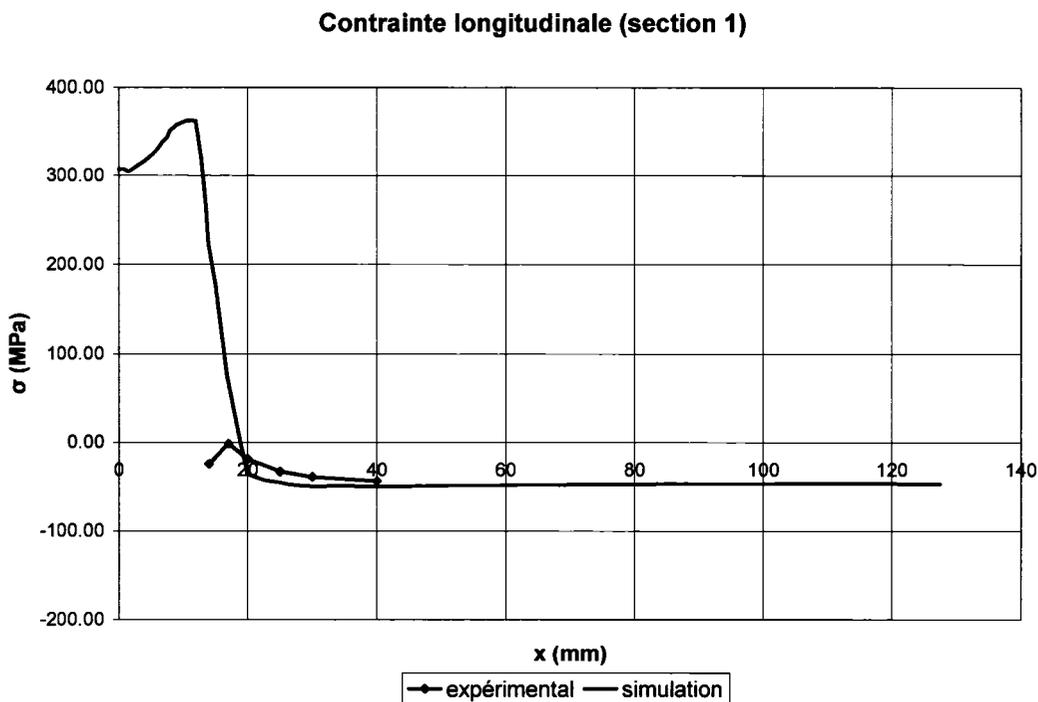
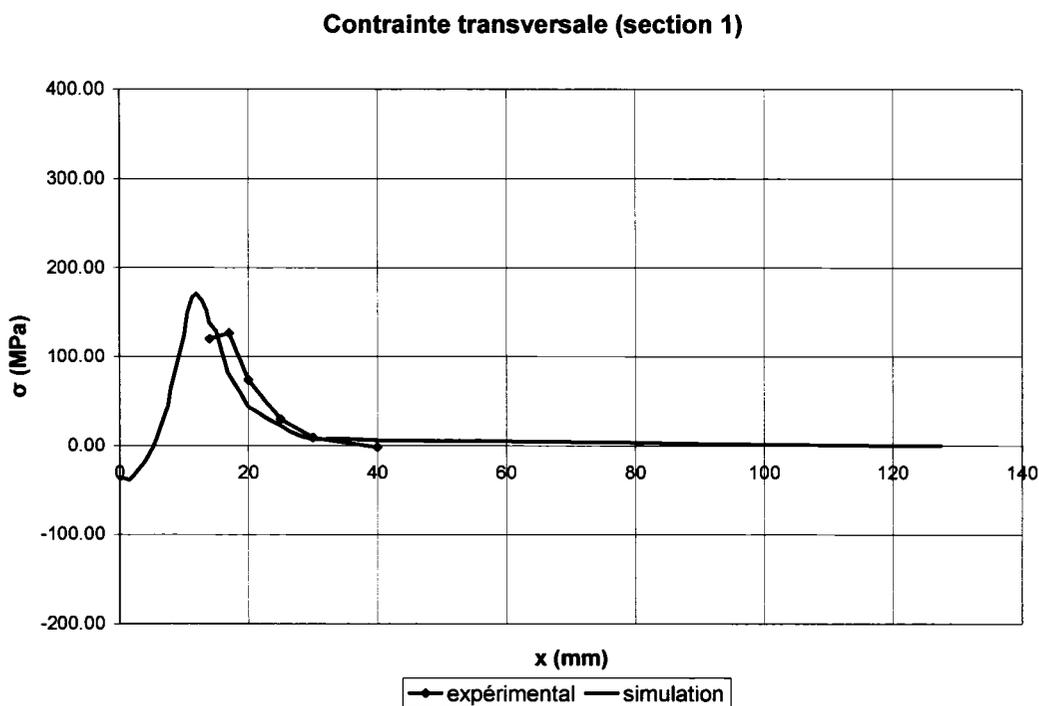


Figure 46 Conditions frontières

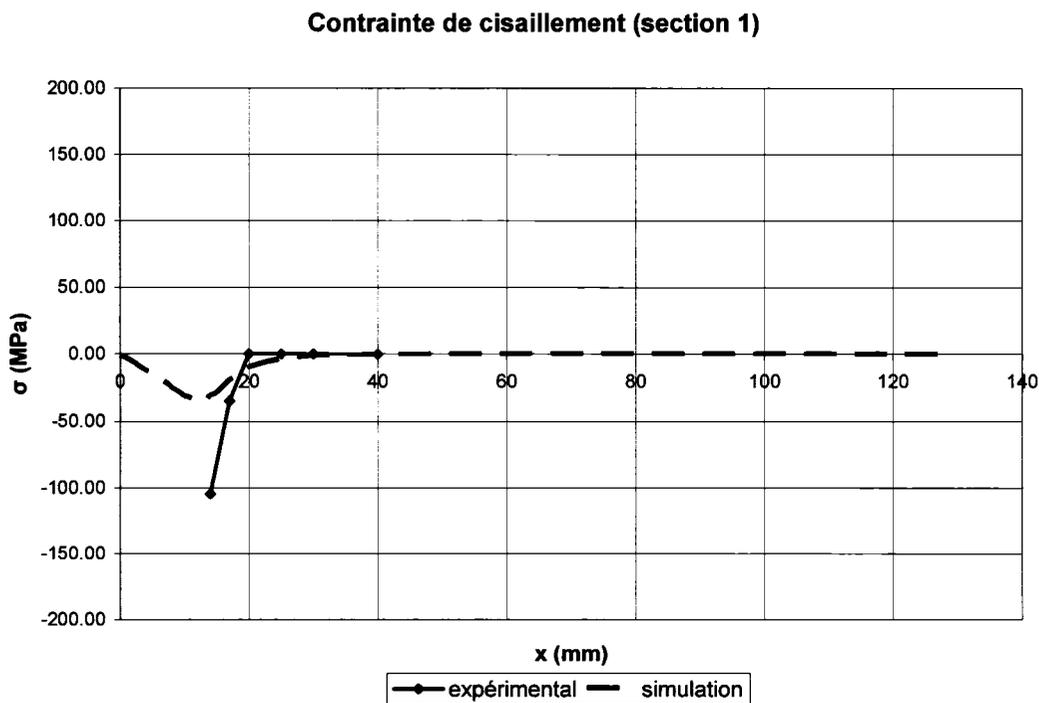
Les profils de contraintes à la position « z » médiane des jauges de déformation ont été extraits des résultats de la simulation afin de les comparer avec les résultats expérimentaux. Les graphiques 43 à 45 montrent la comparaison des contraintes longitudinale, transversale et de cisaillement à l'état final. Les contraintes pendant le soudage ne sont pas comparées faute de base de comparaison; les mesures expérimentales doivent être ajustées afin de compenser la dilatation thermique des jauges de déformation. L'étude de la compensation thermique des jauges reste à être complétée. Les trois graphiques montrent que la différence entre les méthodes numérique et expérimentale est très faible si l'on exclut la jauge la plus près du centre de la soudure. Les jauges de déformation R1 et R7 sont situées très près de la soudure, soit à 14 mm du centre et environ 8 mm du bord de la soudure. Il est fort probable que ces jauges aient été endommagées par la chaleur au cours de l'expérimentation.



Graphique 43 Comparaison des contraintes longitudinales sur le dessus de la plaque



Graphique 44 Comparaison des contraintes transversales sur le dessus de la plaque



Graphique 45 Comparaison des contraintes de cisaillement sur le dessus de la plaque

Afin de valider la précision des résultats près du cordon de soudure, l'utilisation d'une autre méthode de mesure devrait être envisagée, telle que la mesure par rayons X. Les courbes de la section 2 sont présentées à l'annexe 3.

Malgré les valeurs erronées fournies par les jauges les plus près du cordon de soudure, les graphiques précédents permettent de démontrer que le modèle des éléments finis permet de prédire avec une précision fort respectable les contraintes résiduelles générées par le procédé de soudage. La figure 47 présente les contraintes longitudinales à la fin du refroidissement.

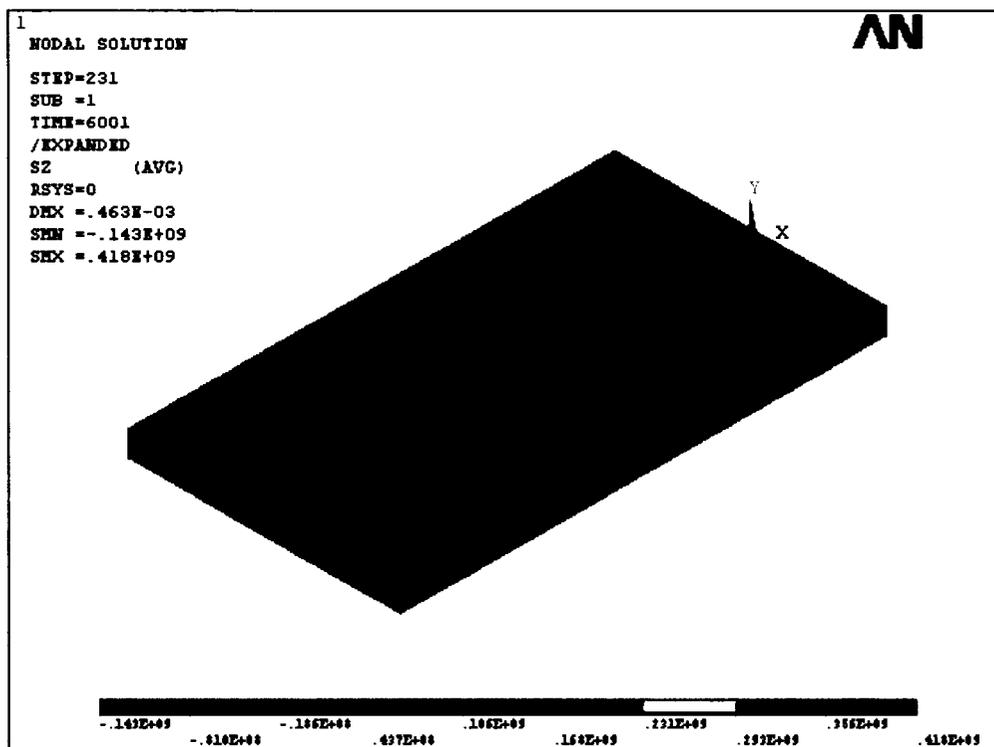


Figure 47 Contraintes longitudinales dans la plaque

5.4 Ajout du cordon de soudure

Afin de valider l'utilisation de la méthode « birth and death » présentée à la section 2.4, un deuxième modèle a été réalisé en ajoutant cette fois les éléments du cordon de

soudure. Le modèle, présenté à la figure 48, contient 104 852 éléments et 120 616 nœuds.

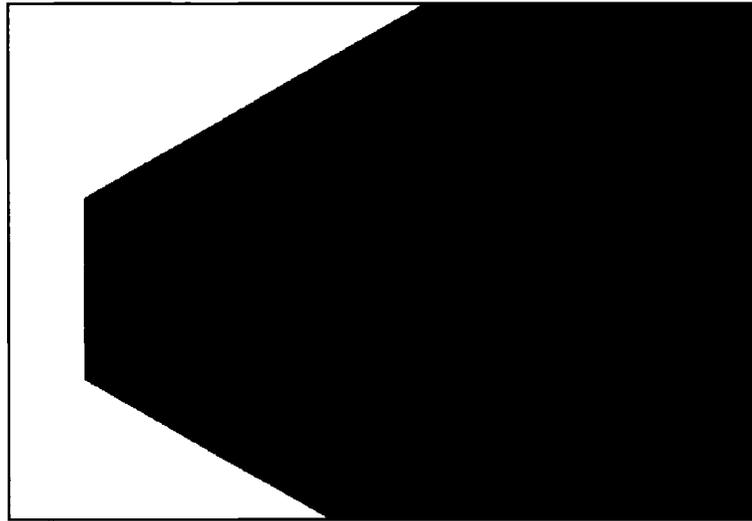
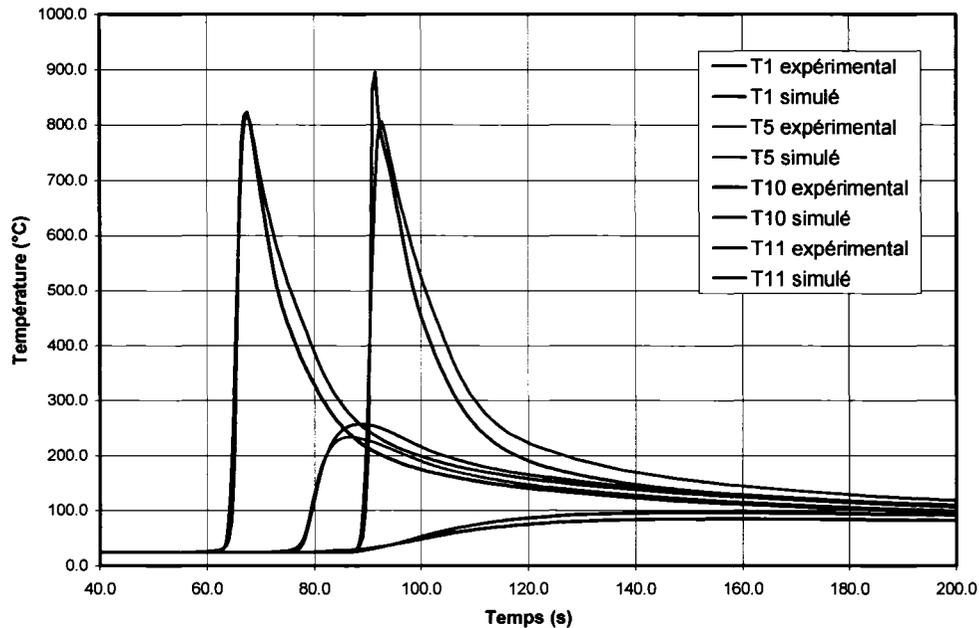


Figure 48 Modèle avec cordon de soudure

5.4.1 Analyse thermique

Les paramètres de la soudure utilisés sont les mêmes que ceux déterminés dans la section 5.2. Les propriétés du matériau sont les propriétés initiales, sans ajustement, mais le facteur de rendement utilisé est celui trouvé à la section 5.2.1 qui est de 82 %. Au début de l'analyse, tous les éléments du dépôt de soudure sont désactivés et la température de leurs nœuds est initialisée à la température de vaporisation (2400 °C), tel que suggéré par Wahab [8]. Le graphique 46 présente les résultats des profils de température. On remarque que la température au thermocouple T1 est identique pour les résultats de la simulation et de l'expérimentation. Les températures aux autres thermocouples sont un peu plus basses dans le cas de la simulation, mais sont tout de même très près de l'expérimentation. Toutes les étapes effectuées à l'analyse précédente, soit l'ajustement des propriétés du matériau, du facteur de rendement et des dimensions du double ellipsoïde pourraient être reprises afin d'amener les résultats numériques le

plus près possible des résultats expérimentaux. Ces étapes sont ici négligées puisque que le but de cette analyse est de démontrer la possibilité de modéliser l'ajout de matière.



Graphique 46 Profil des températures

5.4.2 Analyse structurale

L'ordinateur employé pour les simulations a été incapable de réaliser la solution du modèle avec le maillage utilisé pour l'analyse thermique. Le manque de mémoire vive a empêché la solution du modèle, qui contient tout de même 361 848 degrés de liberté et est hautement non-linéaire. Un modèle plus petit, présenté sur la figure 49, a donc été développé pour le calcul des contraintes résiduelles. Il contient 43 696 éléments et 52 407 nœuds et a facilement été solutionné par l'ordinateur. Les graphiques 47 à 49 montrent la comparaison entre les contraintes mesurées expérimentalement et celles obtenues par les simulations, avec et sans la modélisation du cordon de soudure. La différence la plus évidente entre les deux simulations se retrouve dans la zone plastifiée, soit près du centre de la soudure : le profil des courbes de la simulation avec dépôt de soudure est très saccadé. Cette irrégularité est probablement due au fait que les éléments du modèle avec dépôt sont trop grossiers dans cette région. Par ailleurs, les contraintes

obtenues à l'extérieur de la zone plastifiée sont pratiquement identiques pour les deux modèles.

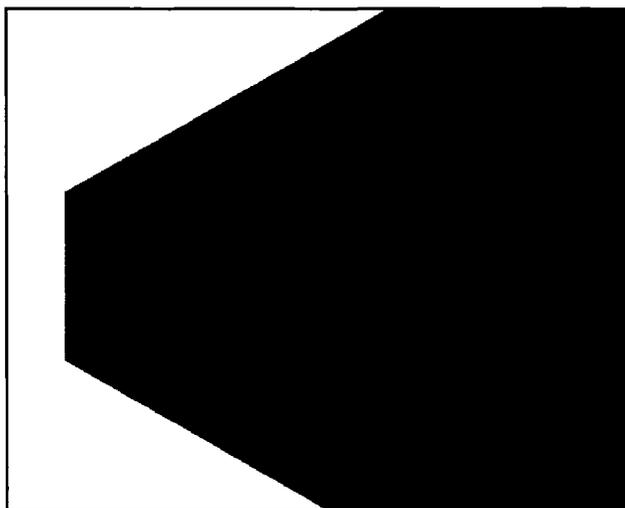
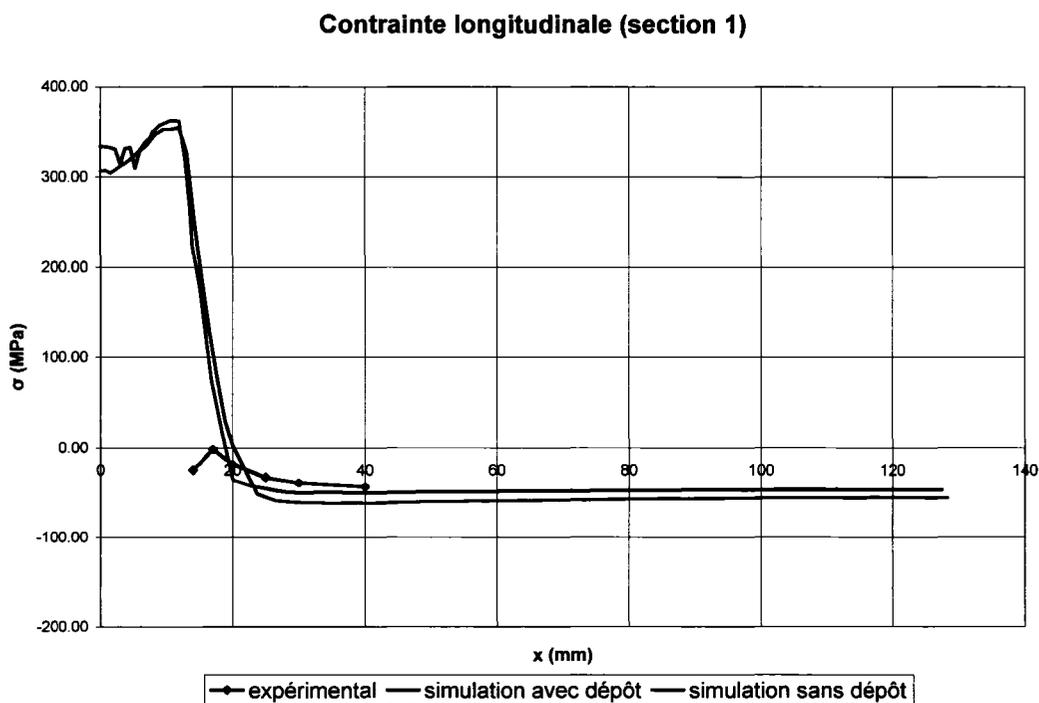
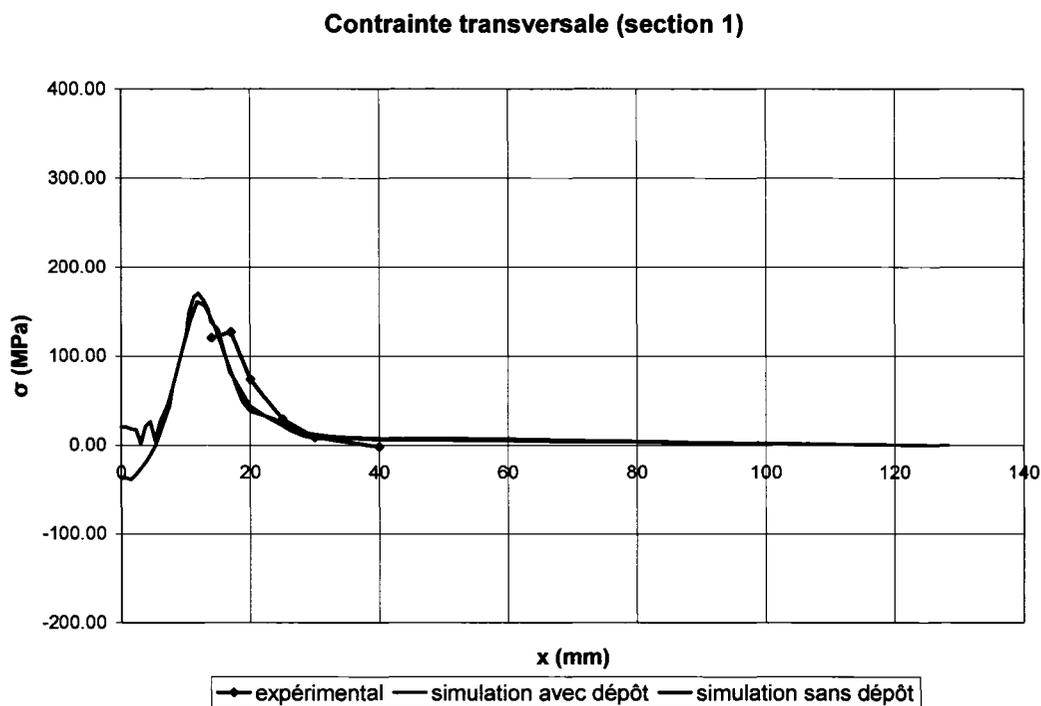


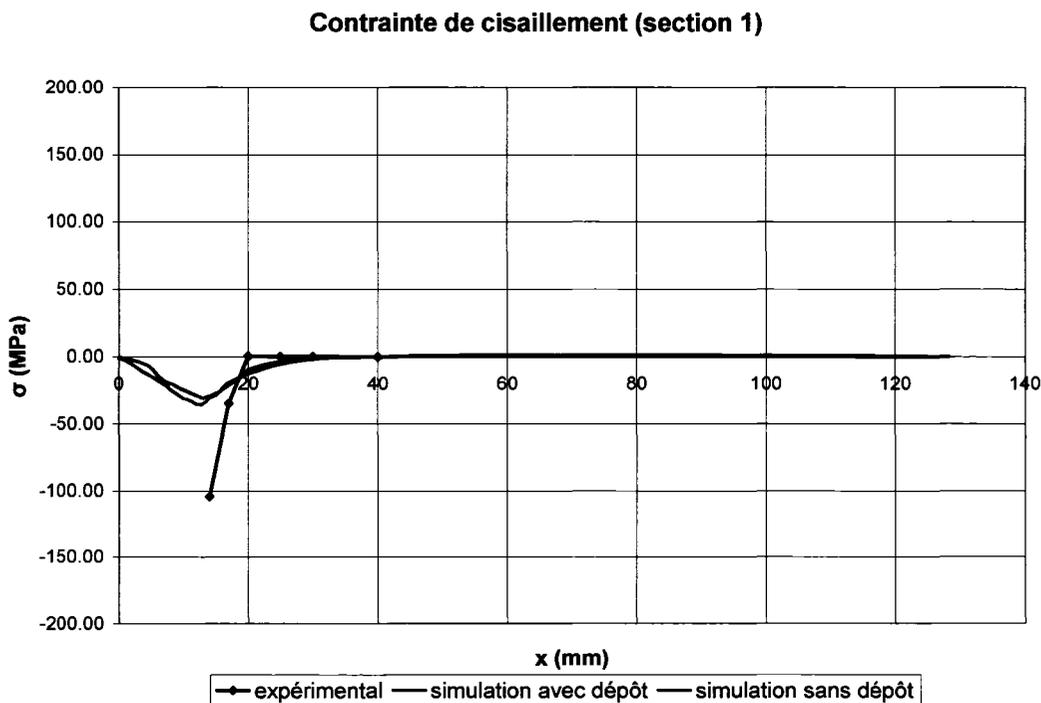
Figure 49 Modèle avec cordon de soudure (maillage grossier)



Graphique 47 Comparaison des contraintes longitudinales sur le dessus de la plaque



Graphique 48 Comparaison des contraintes transversales sur le dessus de la plaque



Graphique 49 Comparaison des contraintes de cisaillement sur le dessus de la plaque

Les dimensions du maillage peuvent encore être mises en cause pour expliquer cette différence. Il est par contre aussi logique que, puisque la quantité de matière a augmenté avec l'ajout du dépôt de soudure dans la zone plastifiée qui est en tension, la compression soit plus importante à l'extérieur de cette zone. Le profil des contraintes longitudinales sur toute la plaque peut être observé sur la figure 50.

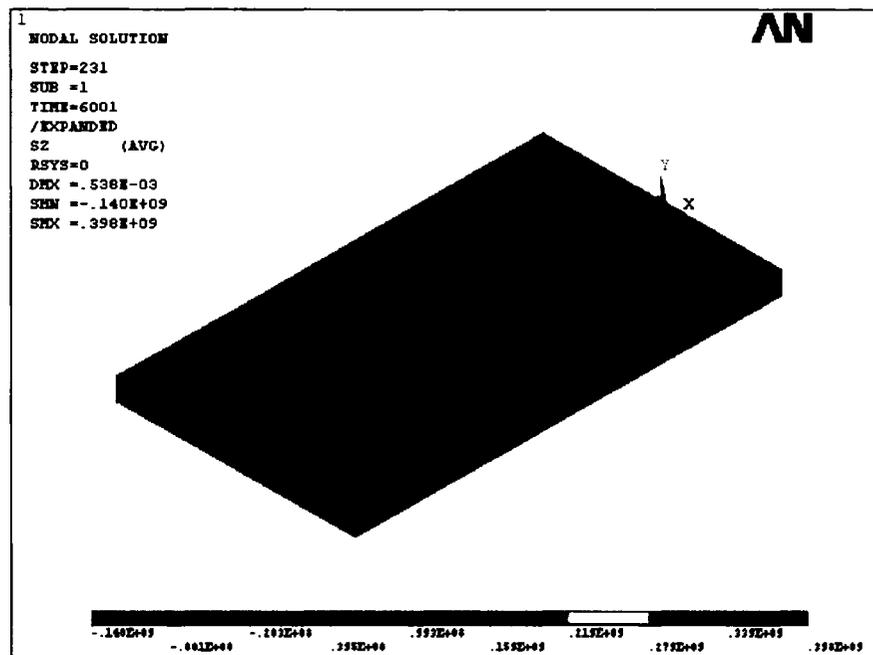


Figure 50 Contraintes longitudinales dans la plaque

En résumé, la simulation par éléments finis a permis de reproduire très fidèlement le profil thermique du procédé de soudage obtenu expérimentalement. Elle a également permis de prédire les contraintes résiduelles avec une précision très acceptable, mais les résultats près du cordon de soudure devraient être validés par une autre expérimentation puisque les résultats obtenus semblent douteux. L'ajout du cordon de soudure dans la simulation semble être important puisqu'il a une influence certaine sur la contrainte longitudinale. Cet ajout a également permis de découvrir les limites du système utilisé pour la simulation. L'utilisation d'ordinateurs plus puissants pourrait être envisagée, tout

comme le développement d'un modèle plus « léger » qui permettrait d'obtenir plus rapidement des résultats aussi précis. Il faudrait probablement privilégier la méthode du remaillage, présentée à la section 1.4.3. Cette méthode consiste à raffiner le maillage uniquement autour de la source de chaleur : le maillage doit donc être modifié à chaque temps de calcul, la zone raffinée se déplaçant avec la source de chaleur. N'étant pas disponible dans le logiciel utilisé, il faudrait soit tenter d'ajouter cette fonctionnalité, soit programmer un code « maison » pour pouvoir l'employer.