

## CHAPITRE 4

### ANALYSE DES DIFFÉRENTS MODÈLES

Les modèles présentés au chapitre 2 sont ici analysés. L'analyse de la convergence de la taille des éléments est d'abord réalisée pour chaque modèle. Les résultats sont ensuite comparés afin de valider la précision du modèle par sections et du modèle mixte. Finalement, l'analyse de la convergence des incréments de temps est effectuée.

La simulation est basée sur l'essai expérimental qui est présenté au chapitre 5, mais avec une plaque plus courte afin de pouvoir obtenir plus rapidement les résultats (voir figure 32). Un cordon de soudure est déposé sur le dessus d'une plaque simplement supportée. Une intensité de courant de 251.5 ampères, une tension de 28.2 volts et une vitesse d'avance de 6 mm / s sont utilisés pour les simulations. Le facteur d'efficacité utilisé est de 75 %. Il ne sera pas optimisé puisque c'est la variation des résultats des différents modèles qui est observée, et non leur précision. L'optimisation du facteur de rendement sera effectuée au chapitre 5, lors de la comparaison avec les résultats expérimentaux.

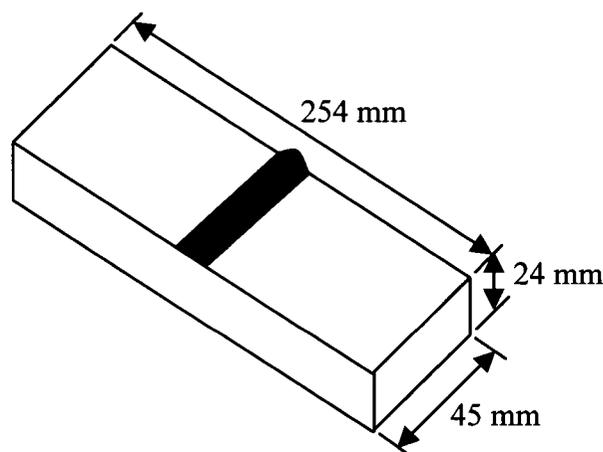


Figure 32 Pièce analysée

#### 4.1 Analyse de la convergence du maillage

L'analyse de la convergence des résultats relativement à la taille du maillage est réalisée en fonction du nombre d'éléments sur la longueur, la largeur et l'épaisseur de la plaque (la longueur étant considérée comme la direction parallèle à la soudure). Pour chaque analyse, deux paramètres sont gardés constants et le troisième est augmenté jusqu'à l'obtention de la convergence. Deux points de mesure sont utilisés; ils se situent à la mi-longueur du cordon de soudure. Le premier est situé sur le dessus de la plaque et le second est sous la plaque, tel que démontré par la figure 33. La température maximale atteinte par chaque point et la contrainte équivalente de Von Mises à l'état final sont utilisées pour définir la convergence.

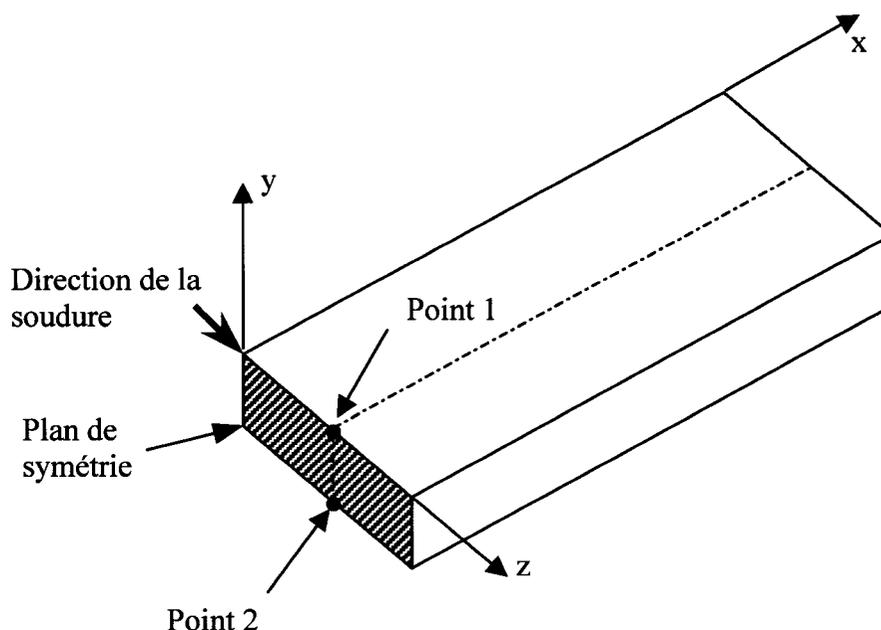
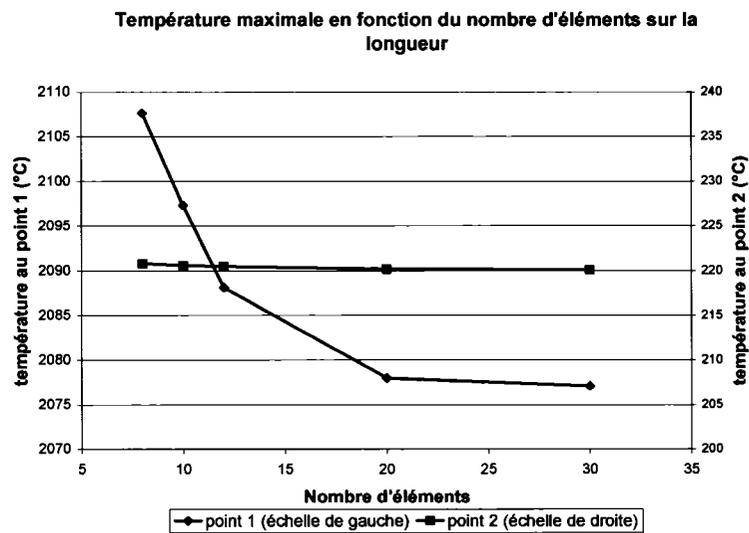


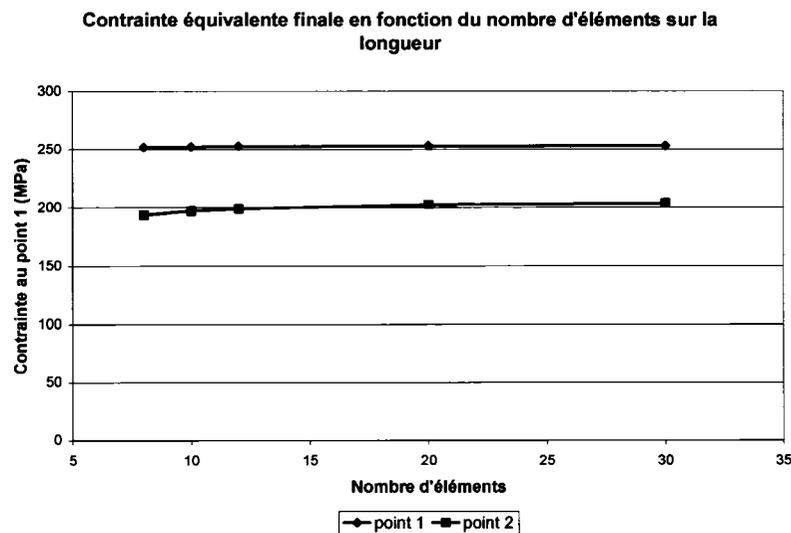
Figure 33 Points de comparaison

Les graphiques 10 et 11 montrent les résultats obtenus pour l'augmentation du nombre d'éléments sur la longueur pour le maillage uniforme. Le passage de 20 à 30 éléments fait varier la température du point 1 de 0,9 °C et du point 2 de 0,1 °C, pour un écart

d'environ 0,05 %. Les contraintes varient quant à elles de 0,2 MPa et 1,1 MPa, pour un écart de 0,08 % et 0,5 % respectivement. La convergence a donc été atteinte avec 20 éléments. La même méthodologie est utilisée pour la convergence selon la largeur et l'épaisseur de la plaque. Les valeurs obtenues sont de 70 éléments sur la largeur et de 20 éléments sur l'épaisseur. Le maillage choisi contient donc 28 000 éléments et 31 311 nœuds. Les courbes des deux dernières analyses sont présentées à l'annexe 2.



Graphique 10 Résultats thermiques de l'analyse de convergence



Graphique 11 Résultats des contraintes de l'analyse de convergence

La convergence du maillage par sections est réalisée en considérant une section raffinée de 30 mm, une section moyenne de 30 mm et une section grossière de 67 mm. À chaque changement de section, la taille des éléments est multipliée par deux. L'optimisation de la taille des sections et de la variation de la taille des éléments sera réalisée à la section 4.2, en comparaison avec le maillage uniforme. La variable « nombre d'éléments » utilisée est en fait le nombre d'éléments qu'il y aurait s'il n'y avait pas de changement de section; il sert donc à définir la taille des éléments dans la section raffinée. Le maillage optimal, présenté à la figure 34 et obtenu à l'aide des courbes présentées à l'annexe 2, est de 24 éléments sur la longueur, 150 sur la largeur et 20 sur l'épaisseur, soit un modèle de 20 040 éléments et de 23 024 nœuds.

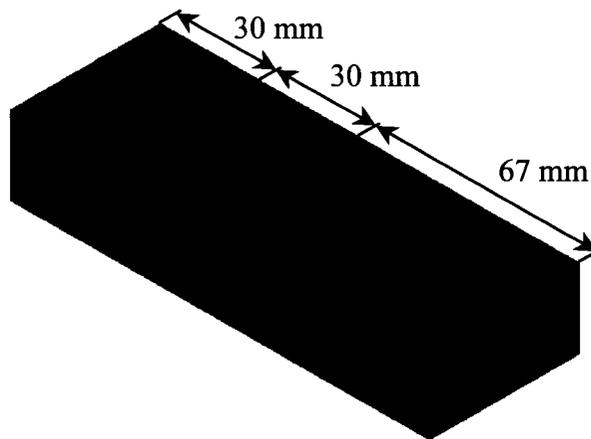


Figure 34 Maillage par sections

Le maillage mixte utilisé a exactement la même forme que le maillage par sections, mis à part que le changement de type d'éléments se produit au milieu de la deuxième section. Le maillage obtenu, qui est présenté à la figure 35, comporte 27 éléments sur la longueur, 150 sur la largeur et 20 sur l'épaisseur, soit un modèle de 21 706 éléments et de 24 507 nœuds.

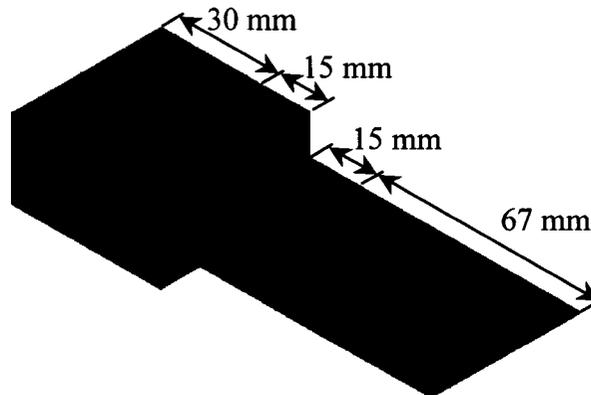


Figure 35 Maillage mixte

#### 4.2 Comparaison et optimisation des maillages

Afin de vérifier la précision des maillages par sections et mixte, ils sont comparés au maillage uniforme. Les résultats des contraintes finales longitudinales et transversales à la mi-longueur, aux surfaces supérieure et inférieure de la plaque sont analysés (voir figure 36). Les profils de température aux mêmes endroits sont également comparés pour le temps  $t = 4.5$  secondes, soit le temps où le centre de la source de chaleur est au centre de la plaque. Ces résultats serviront également pour l'optimisation de la taille des sections et de la variation de la taille des éléments entre les sections.

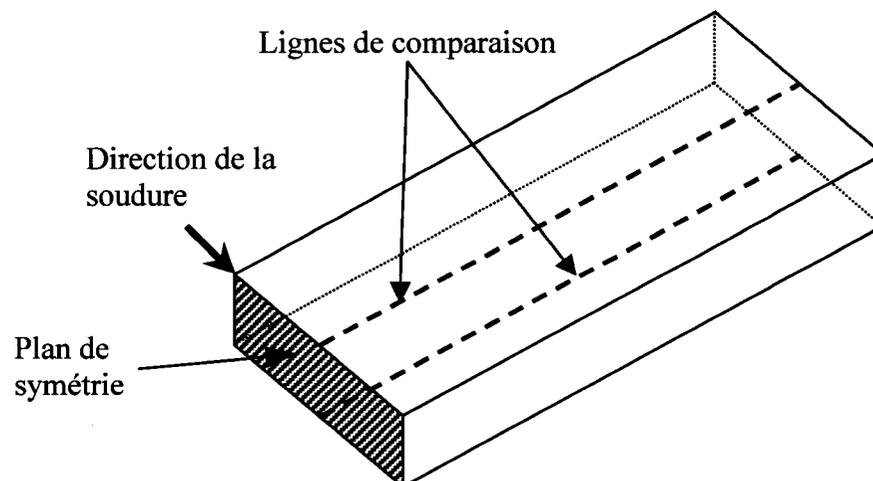
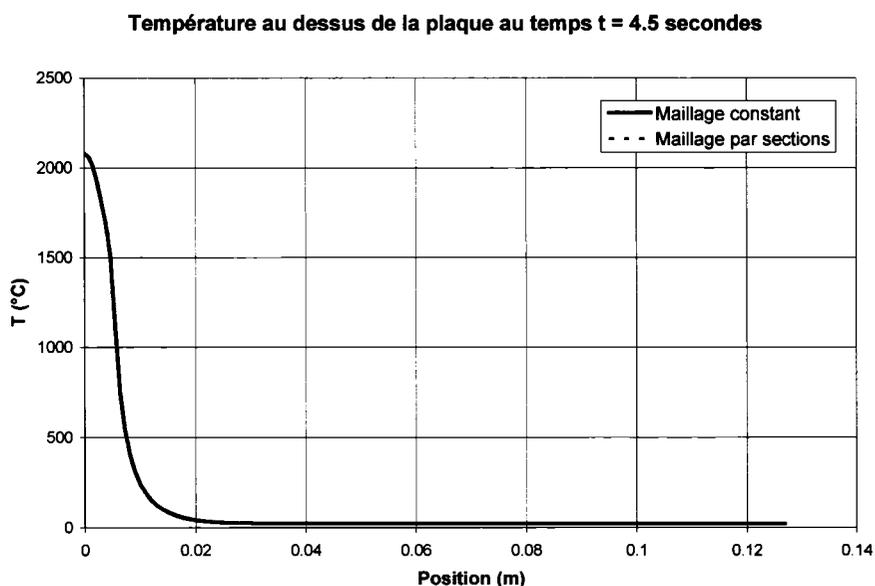


Figure 36 Lignes de comparaison

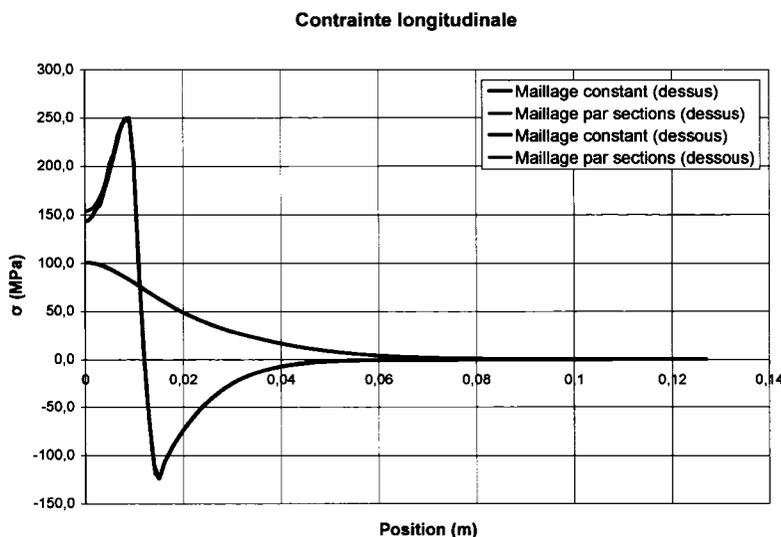
### 4.2.1 Maillage par sections

Le graphique 12 montre le profil de température du maillage uniforme et du maillage par sections. On remarque que les courbes sont pratiquement confondues. En fait, l'erreur maximale entre les profils est de 0.1 %. Le maillage par sections est donc aussi précis que le maillage uniforme pour l'analyse thermique.



Graphique 12 Comparaison des températures  
(dessus de la plaque)

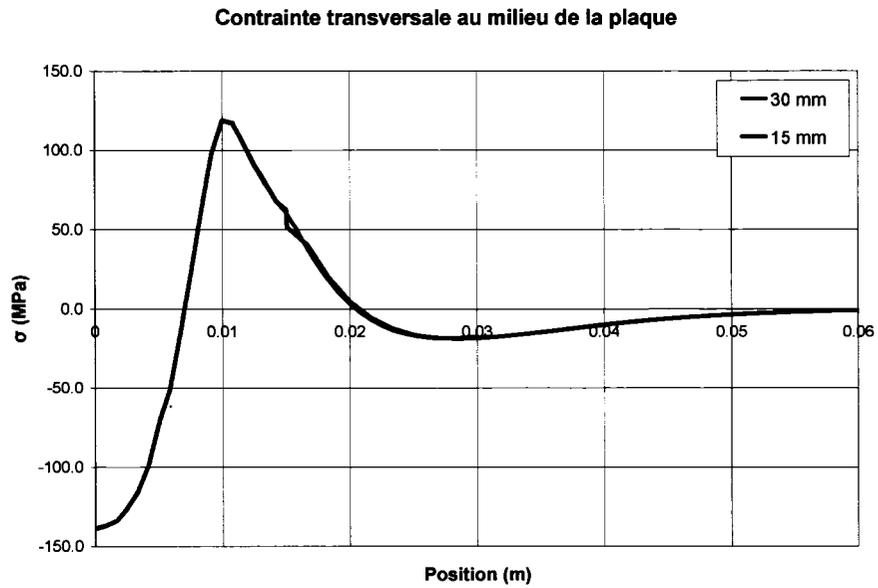
En ce qui a trait aux profils des contraintes, présentés sur le graphique 13, on remarque une légère différence près de la position « 0 », soit au centre de la soudure, au-dessus de la plaque. Cette différence, qui est d'environ 7 % est probablement due à la différence de la densité du maillage dans la zone la plus sensible du modèle ; elle est tout de même considérée négligeable puisqu'elle est très ponctuelle.



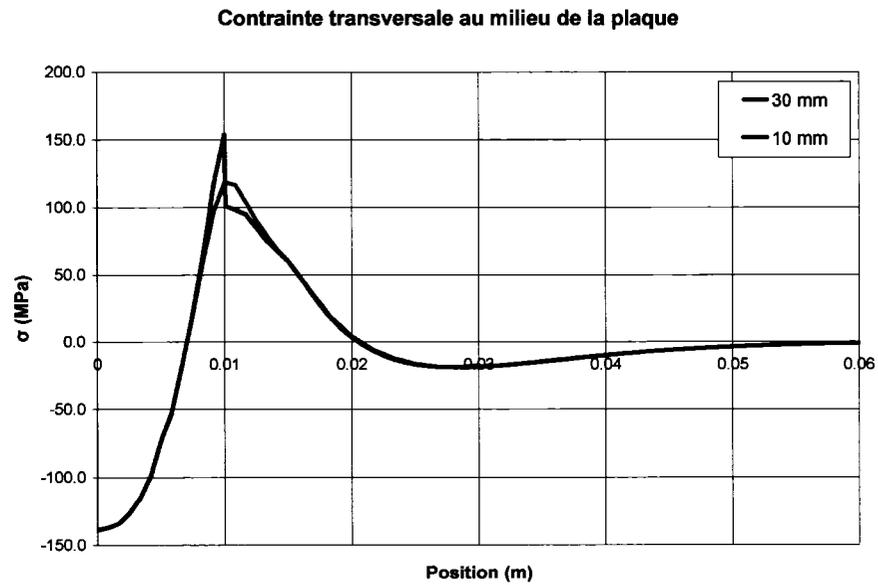
Graphique 13 Comparaison des contraintes longitudinales

Les résultats obtenus par la méthode des sections étant très satisfaisants, l'optimisation de la taille des sections doit maintenant être réalisée afin de réduire le nombre d'éléments tout en conservant une précision adéquate. La première étape est la réduction de la section la plus raffinée. La position de la fin de la deuxième section est gardée constante à 60 mm, et la position de la fin de la première section est diminuée jusqu'à ce qu'on remarque une divergence entre les résultats aux changements de section. Puisque le modèle par section ne présente pratiquement aucune erreur pour les profils de température, seules les contraintes sont comparées.

Le graphique 14 démontre qu'avec une première section de 15 mm, une légère discontinuité apparaît au niveau du changement de section pour le profil des contraintes transversales du dessus de la plaque. Pour sa part, le graphique 15 démontre que cette discontinuité devient très significative lorsque la taille de la première section est réduite à 10 mm. La taille de la section choisie est donc de 15 mm, ce qui donne un modèle de 12 480 éléments, soit une réduction de 38 % par rapport au modèle initial dont la taille de la première section est de 30 mm. Ce maillage est présenté à la figure 37.



Graphique 14 Optimisation de la taille de la première section



Graphique 15 Optimisation de la taille de la première section

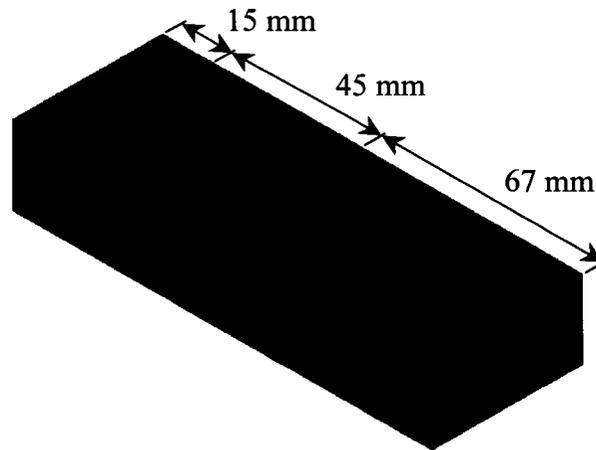
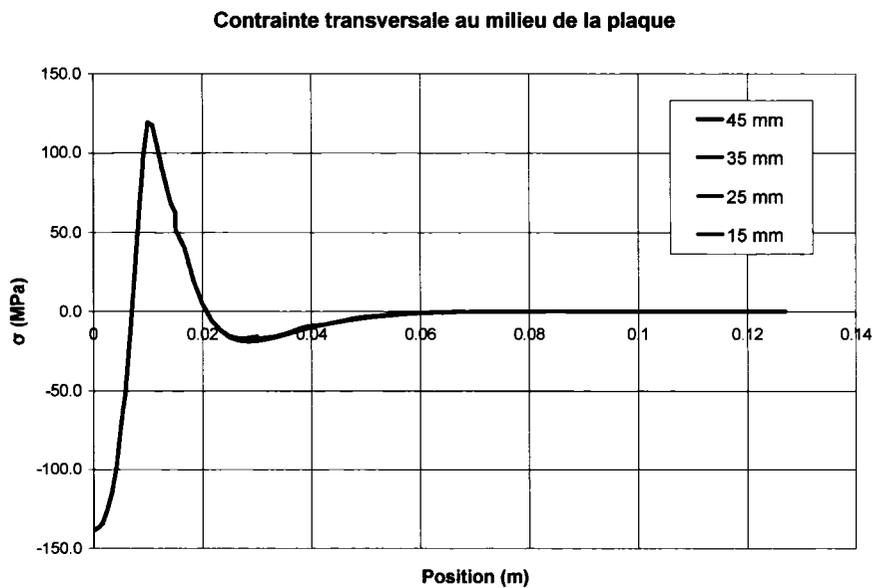
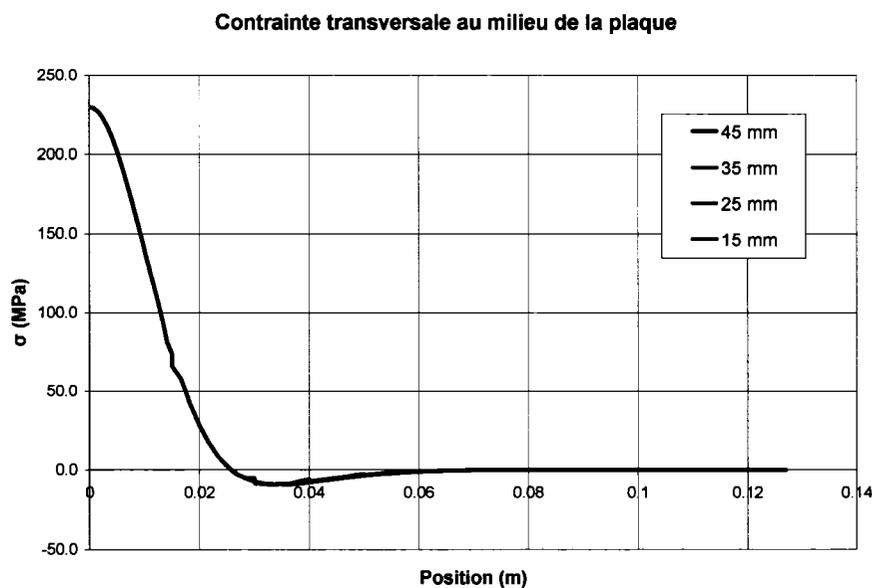


Figure 37 Maillage optimisé de la première section

L'optimisation de la deuxième section se fait de la même manière, soit en fixant la taille de la première section à 15 mm et en diminuant la taille de la seconde. Les graphiques 16 et 17 montrent qu'en passant de 45 mm à 15 mm, il n'y a pratiquement aucune variation significative des résultats. La taille de cette section sera établie à 15 mm, puisqu'une dimension plus petite ne serait pas satisfaisante pour les analyses ultérieures ; réduire encore plus la section rendrait l'augmentation du facteur de variation de la taille des éléments entre chaque section plus difficile, puisque des éléments très grossiers se trouveraient près de la zone de la soudure. De plus, l'analyse expérimentale présentée au chapitre 5 contient plusieurs points d'acquisition qui se retrouveraient dans la zone au maillage grossier, ce qui pourrait compliquer la comparaison avec les résultats expérimentaux. Les dimensions des sections choisies sont donc de 15 mm pour chacune des deux premières sections, et de 97 mm pour la dernière section. Ce maillage, présenté à la figure 38, contient 10 590 éléments pour une réduction de 47 % par rapport au modèle original.



Graphique 16 Optimisation de la taille de la deuxième section



Graphique 17 Optimisation de la taille de la deuxième section

Le maillage présenté à la figure 38 contient 10 590 éléments, dont plus de 80 % se trouvent dans la section la plus raffinée. Puisque la plaque est très épaisse comparativement à la pénétration de la soudure, un maillage raffiné n'est pas nécessaire

sur toute l'épaisseur. Un nouveau maillage est donc modélisé en utilisant les mêmes paramètres que le précédent, mais en divisant la première section en deux et en donnant aux éléments de la section nouvellement créée la taille des éléments de la deuxième section, tel que présenté à la figure 39. Ce maillage contient 6810 éléments, soit 66 % de moins que le modèle original. Le graphique 18 montre que l'ajout de la division n'influence pas les résultats, mis à part une légère inflexion au niveau du changement de section. L'erreur étant très localisée, elle est considérée négligeable. L'ajout de la division permettra d'augmenter le niveau de raffinement du maillage dans la région de la soudure sans obtenir un modèle très long à résoudre.

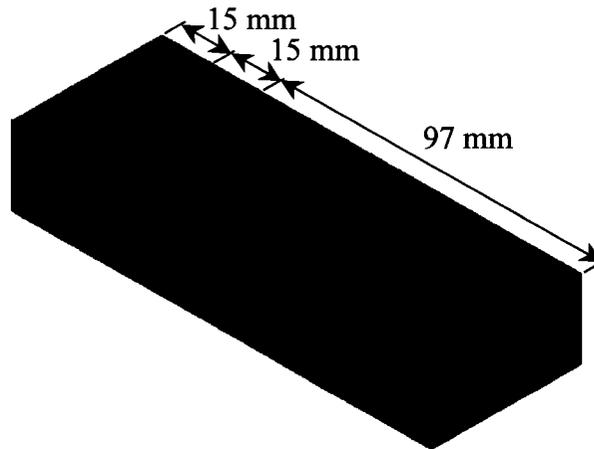


Figure 38 Maillage optimisé de la deuxième section

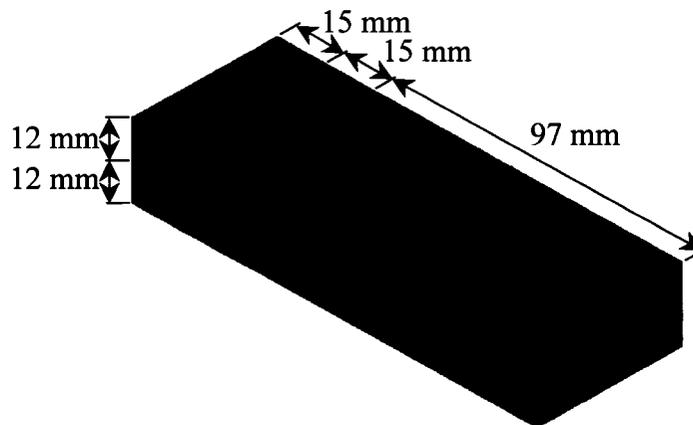
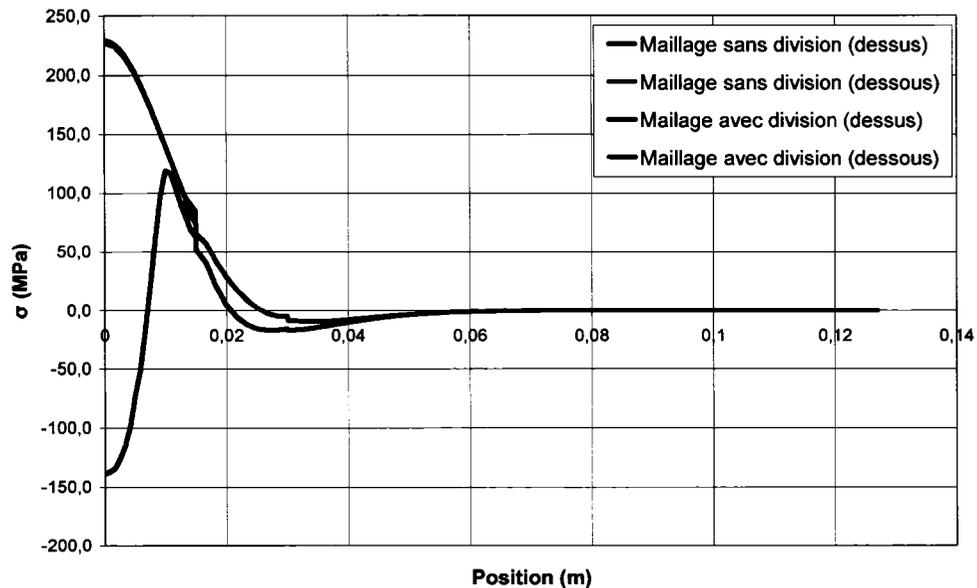


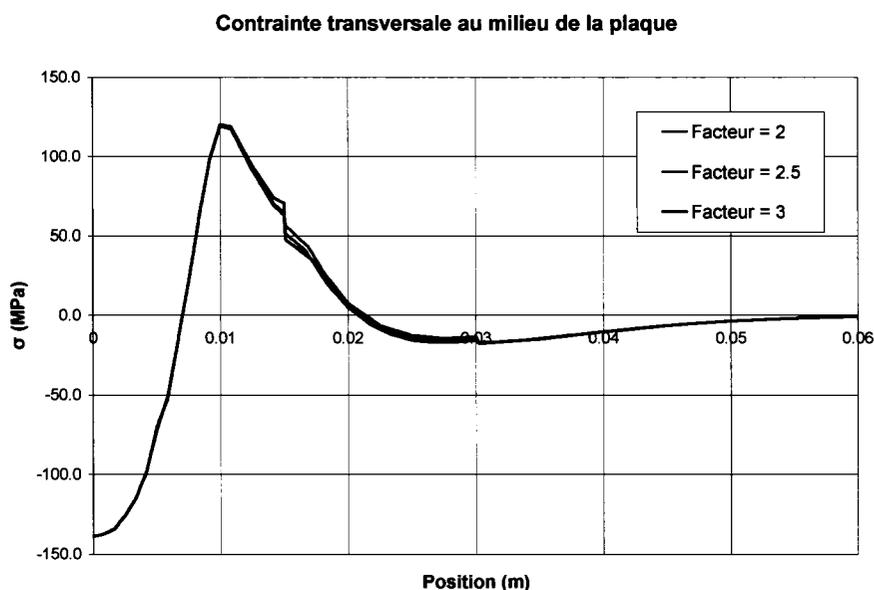
Figure 39 Division de la première section

### Contrainte transversale au milieu de la plaque



Graphique 18 Division de la section raffinée

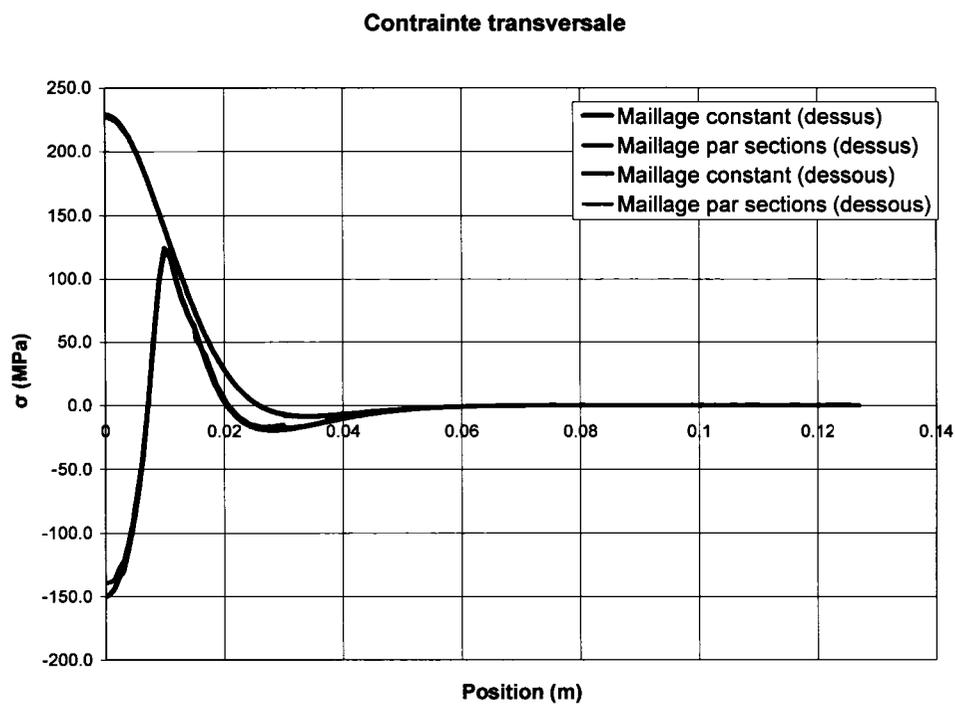
La dernière étape d'optimisation est l'analyse du facteur de variation de la taille des éléments entre chaque section. Tous les modèles présentés précédemment avaient un facteur de variation de « 2 », c'est-à-dire que la taille des éléments est doublée à chaque changement de section. Des facteurs de variation allant de 2 à 3 ont été essayés afin de vérifier s'il est possible de réduire encore plus le nombre d'éléments sans influencer la précision des résultats. Tout comme sur les graphiques précédents, le graphique 19 montre que les courbes sont toutes pratiquement identiques sauf dans les régions de changement de section. Il indique également que le modèle ayant un facteur de « 3 » donne des résultats qui divergent relativement plus dans ces régions que les autres modèles. Le modèle ayant un facteur de variation de « 2,5 » est choisi pour la poursuite de l'analyse.



Graphique 19 Facteur de variation de la taille des éléments

Afin de terminer l'analyse du modèle utilisant la méthode du maillage par sections, un dernier modèle est créé en utilisant tous les paramètres déterminés précédemment. L'optimisation effectuée ayant permis de réduire considérablement la taille du modèle, une marge de manoeuvre est maintenant disponible afin de réduire la taille des éléments, ce qui permet d'obtenir une plus grande précision des résultats. La taille des éléments a donc été réduite de 10 % par rapport à la taille déterminée par l'analyse de convergence. Ce modèle, présenté à la figure 40, contient 7664 éléments, ce qui est tout de même 62 % de moins que le modèle initial et 73 % de moins que le maillage uniforme. Les résultats obtenus sont très près des résultats du modèle utilisant le maillage uniforme, mais en conservant toujours une imprécision d'environ 7 % au niveau du centre de la soudure. Cette légère imprécision permet toutefois de réduire considérablement le temps de calcul. Les simulations ont été effectuées à l'aide d'un microprocesseur « Intel Xeon » à deux processeurs de 3,2 GHz et possédant 2 Go de mémoire vive. Le temps de résolution est de 380 minutes pour le maillage uniforme, comparativement à 56 minutes pour le maillage par sections optimisé. La méthode du maillage par section a donc

généralisé une erreur de 7 %, mais a par contre permis de réduire le temps requis pour la simulation de 85 %. Le profil des contraintes est présenté sur le graphique 20.



Graphique 20 Résultats des contraintes du maillage par sections final

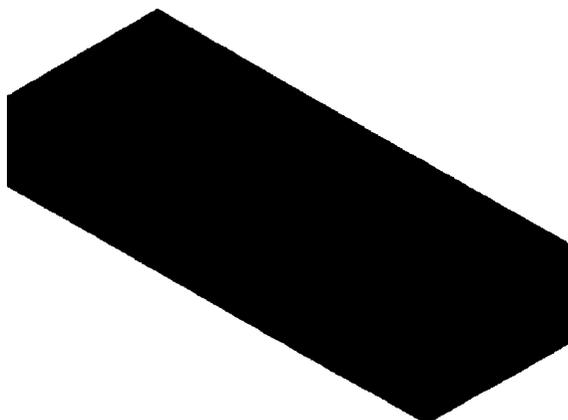
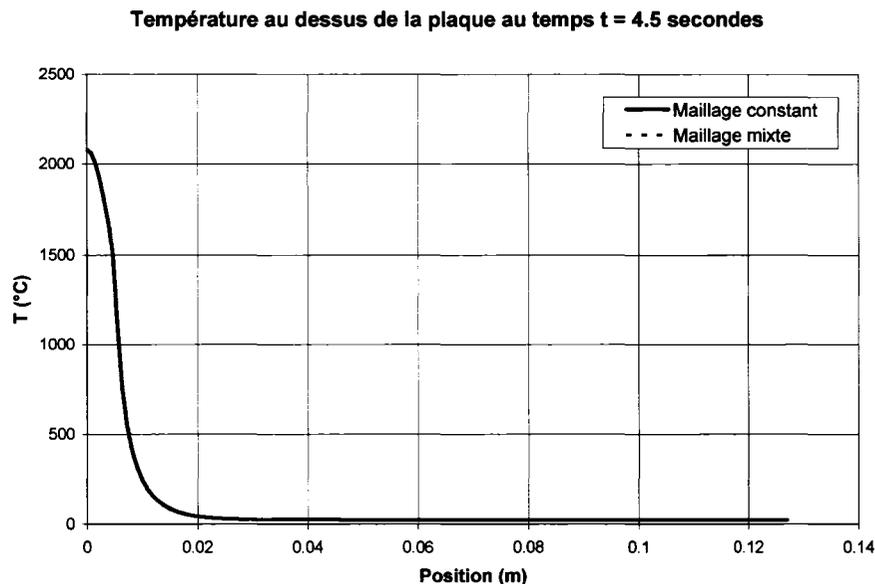


Figure 40 Modèle final par la méthode des sections

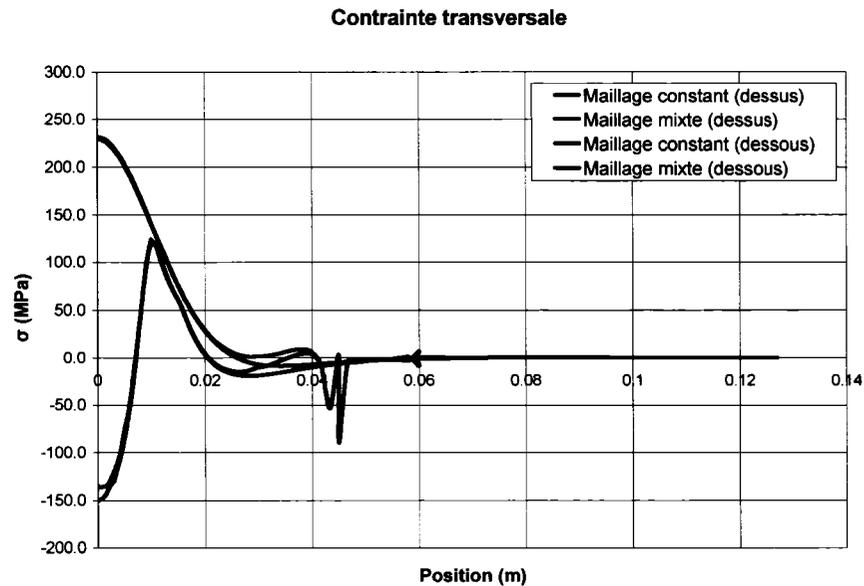
#### 4.2.2 Maillage mixte

Le graphique 21 présente les résultats des profils de température du maillage uniforme et du maillage mixte. Tout comme pour le maillage par sections, les courbes sont parfaitement confondues. Le maillage mixte est donc très efficace pour effectuer l'analyse thermique.



Graphique 21 Comparaison des températures du maillage uniforme vs mixte (dessus de la plaque)

En ce qui a trait aux contraintes, le graphique 22 montre une divergence très importante des résultats à la jonction des éléments briques et coques. Cette divergence n'est pas limitée à une zone restreinte mais s'étale plutôt sur une distance de 25 mm. Afin de résoudre ce problème, le plan de jonction entre les deux types d'éléments doit être éloigné du centre de la soudure afin qu'il soit dans une zone où les contraintes sont pratiquement constantes. Ce modèle contient 21 706 éléments; en éloignant le plan de jonction du centre de la soudure, le nombre d'éléments augmentera, alors qu'il en contient déjà beaucoup plus que le modèle par sections optimisé (7664). On peut donc conclure que pour la présente analyse, le modèle par sections est le plus approprié.



Graphique 22 Comparaison des contraintes transversales

Bien que l'utilisation du maillage mixte ne semble pas approprié pour la présente analyse, un essai a été effectué afin de vérifier la précision d'un tel maillage ou la jonction entre les éléments briques et coques est plus éloignée de la soudure. Pour ce faire, un maillage mixte est généré en utilisant le maillage par sections optimisé obtenu précédemment pour la partie des éléments briques. La jonction avec les éléments coques est placée au centre de la dernière section, tel que présenté sur la figure 41.

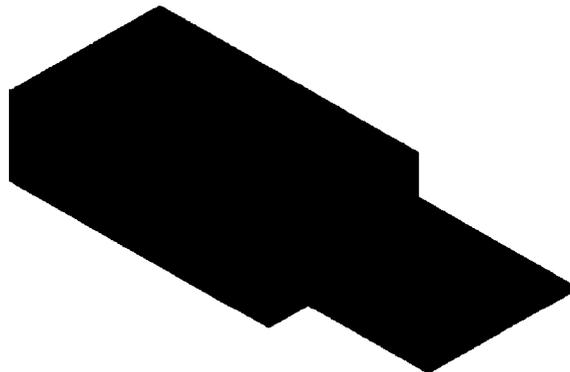
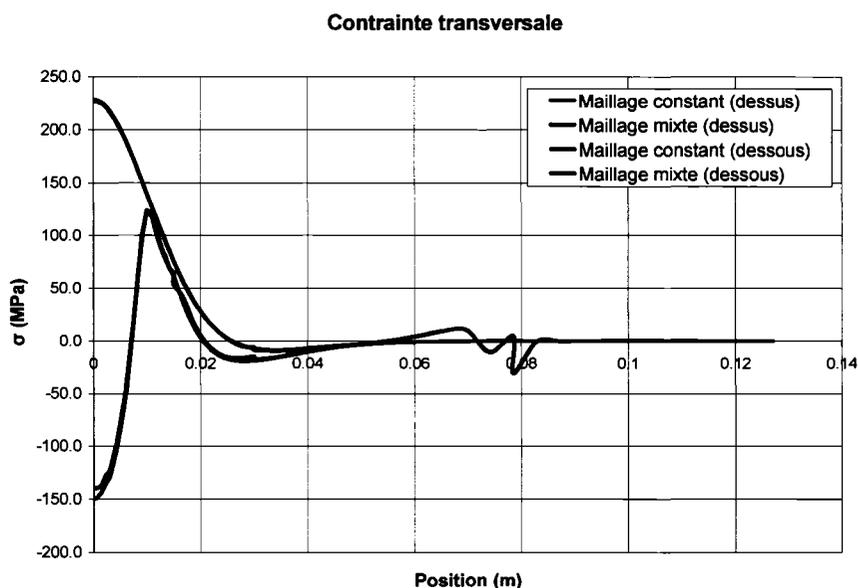


Figure 41 Maillage mixte optimisé

Le graphique 23 démontre qu'en éloignant la jonction du centre de la soudure, l'erreur tend à diminuer. Cette analyse a permis de réduire de 7 % le temps de simulation, mais l'erreur à la jonction est toujours trop importante pour considérer l'utilisation de ce maillage pour les analyses subséquentes. Cependant, l'utilisation d'un tel type de maillage serait très intéressante pour la modélisation d'une pièce ayant des dimensions plus importantes.



Graphique 23 Contraintes transversales du maillage mixte optimisé

### 4.3 Analyse de la convergence des incréments de temps

Deux incréments de temps différents sont utilisés pour les simulations thermique et structurale. Pendant le procédé de soudage, alors que les gradients thermiques sont très élevés, un incrément de temps constant et très court est utilisé. Pendant le refroidissement, plus la température diminue, plus les gradients thermiques tendent vers zéro. L'incrément de temps utilisé augmente graduellement afin de réduire le temps requis pour la simulation tout en conservant un incrément de temps assez court au début du refroidissement.

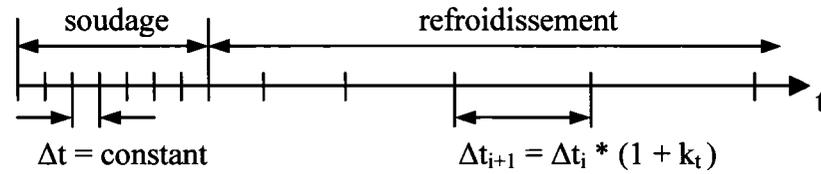
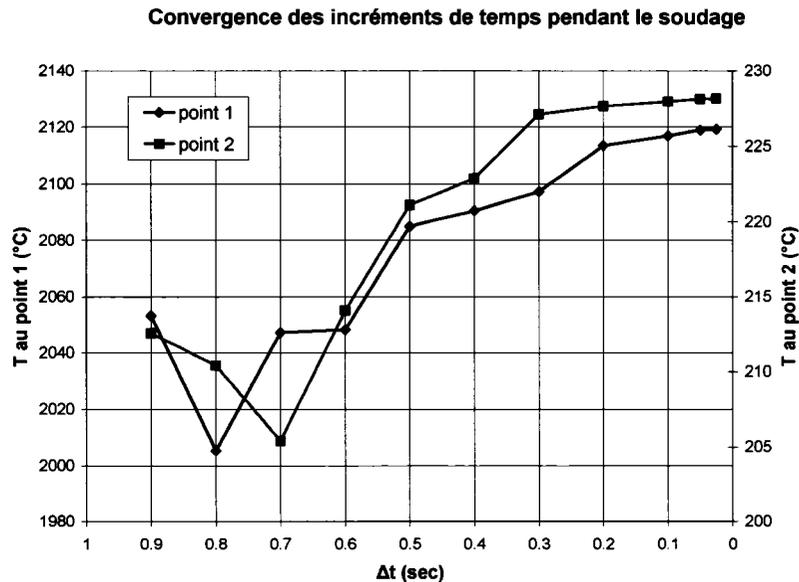


Figure 42 Échelle de temps

### 4.3.1 Analyse thermique

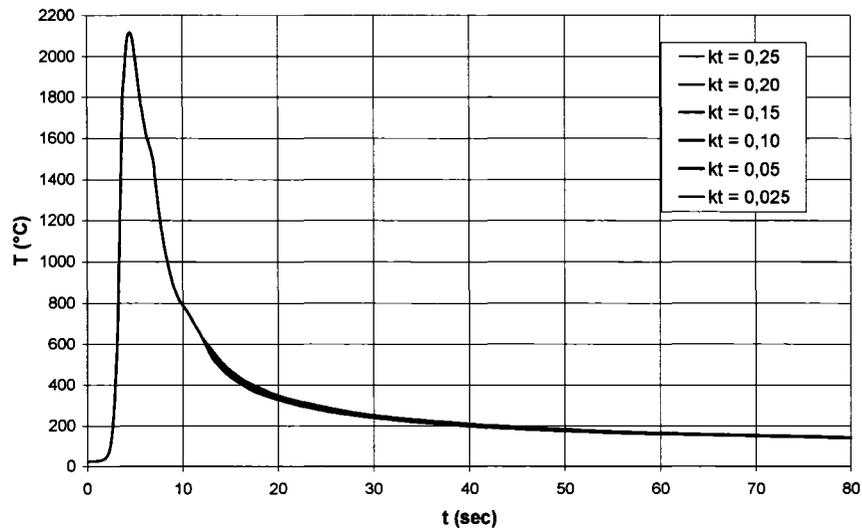
L'analyse de la convergence des incréments de temps pendant le soudage est réalisée en utilisant les mêmes points de mesure que pour la convergence du maillage, présentés à la figure 33. Le maillage utilisé est le maillage optimisé de la figure 40. La température maximale atteinte à chaque point est utilisée pour déterminer la convergence. Le graphique 24 montre les courbes de la convergence des résultats thermiques. Considérant ces résultats, l'incrément de temps choisi est 0.2 seconde : l'erreur entre un incrément de 0.2 seconde et 0.025 seconde n'est environ que de 0.3 %.



Graphique 24 Convergence de l'incrément de temps thermique (pendant le soudage)

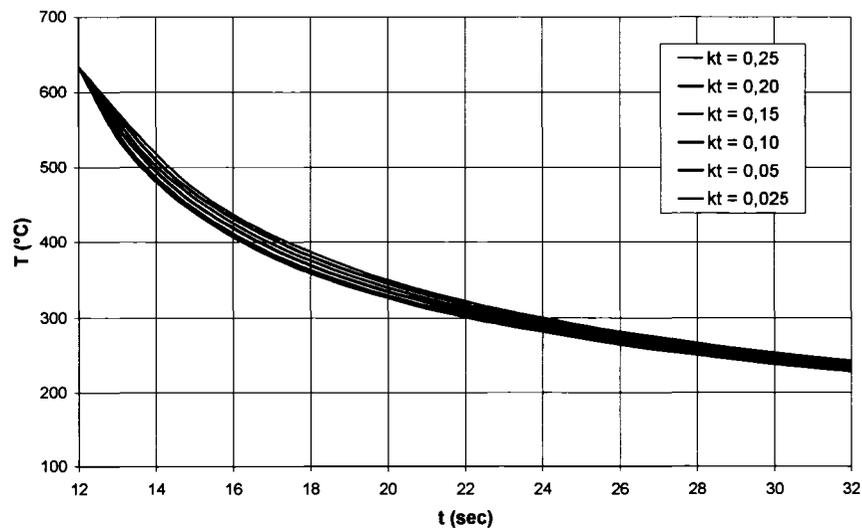
Pour ce qui est du refroidissement, ce n'est pas un incrément de temps qui est déterminé mais plutôt un facteur d'augmentation de l'incrément ( $k_t$ ). Les profils de températures au point 1 sont utilisés afin de déterminer le facteur optimal.

**Convergence des incréments de temps pendant le refroidissement**



**Graphique 25 Convergence de l'incrément de temps thermique (pendant le refroidissement)**

**Convergence des incréments de temps pendant le refroidissement**

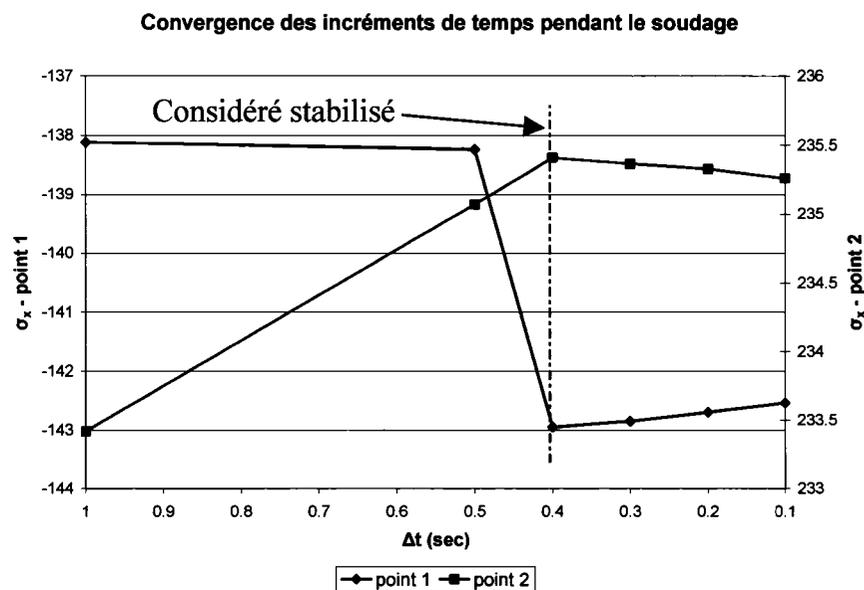


**Graphique 26 Convergence de l'incrément de temps thermique (pendant le refroidissement, vue agrandie)**

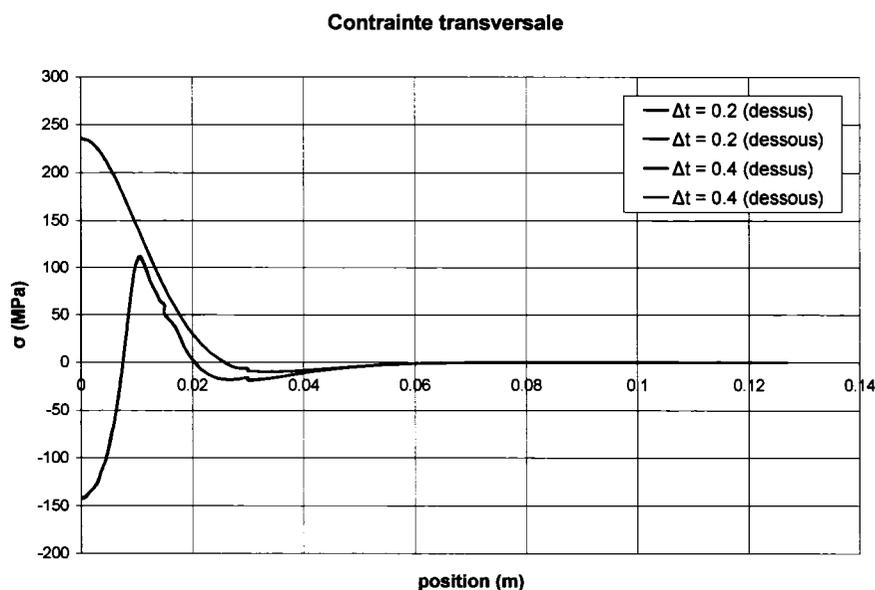
Comme on peut l'observer sur les graphiques 25 et 26, les courbes divergent principalement au début du refroidissement, soit à partir de douze secondes. Elles tendent ensuite à converger au fur et à mesure que le refroidissement progresse. En passant d'un facteur de 0,05 à un facteur de 0,025, il n'y a pratiquement aucune variation des résultats ; la différence maximale entre les deux courbes est de 1 %. Le facteur de 0,05 est donc sélectionné afin de poursuivre les analyses.

### 4.3.2 Analyse structurale

La convergence de l'incrément de temps de l'analyse structurale est réalisée en comparant les résultats de la contrainte transversale aux points présentés à la figure 33. Le graphique 27 démontre que les résultats varient grandement jusqu'à un incrément de 0,4 seconde, pour ensuite varier plus modérément. Le graphique 28 montre la différence des profils de contraintes entre un incrément de 0,4 seconde et un incrément de 0,2 seconde, différence qui est pratiquement inexistante. Un incrément de 0,4 seconde est donc choisi pour l'analyse structurale.

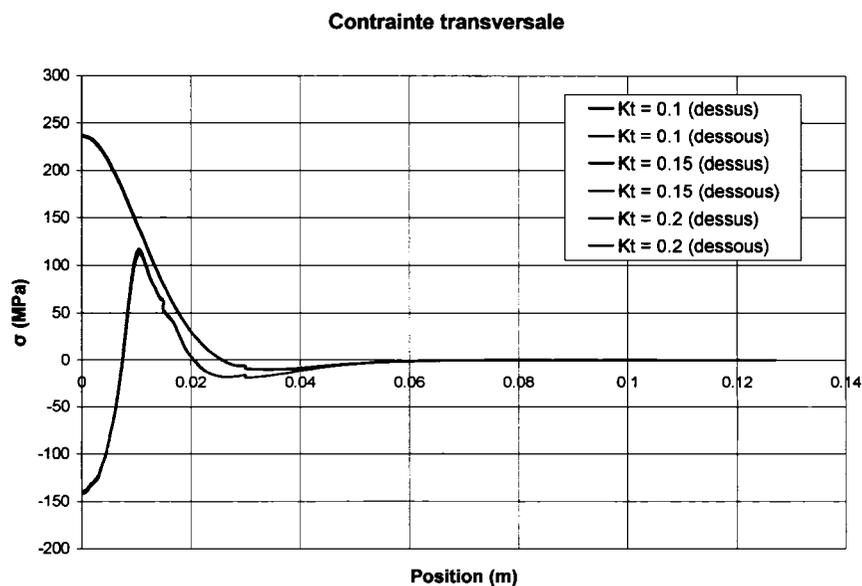


Graphique 27 Convergence de l'incrément de temps structural (pendant le soudage)

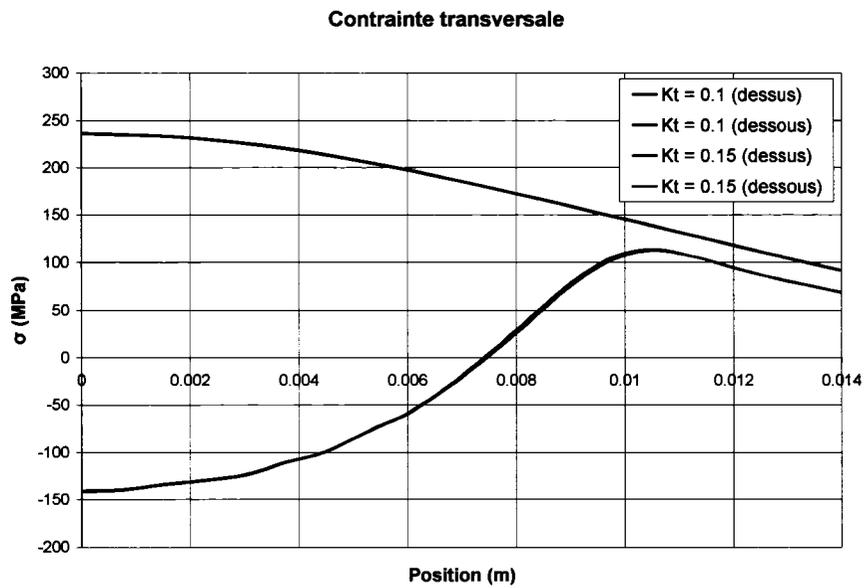
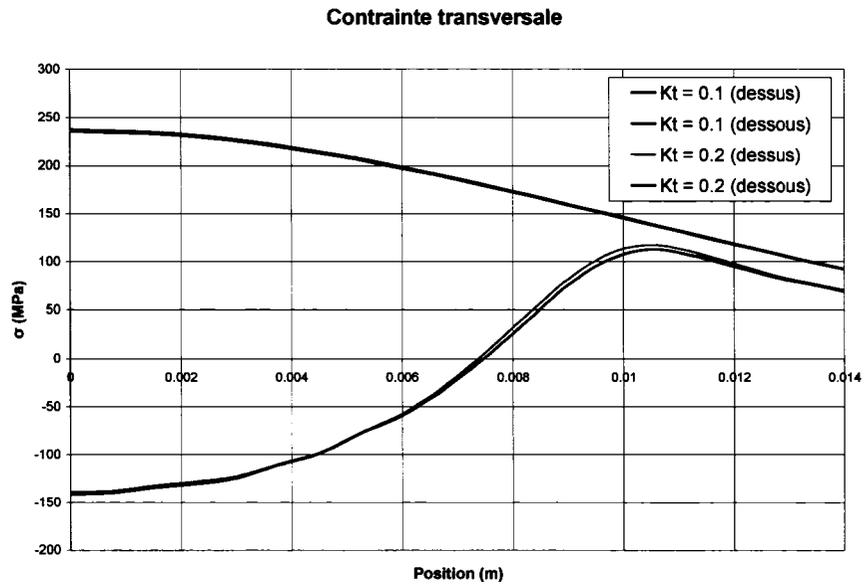


Graphique 28 Comparaisons des contraintes transversales

Le facteur de temps ( $k_t$ ) choisi pour le refroidissement est de 0,15. Le graphique 29 montre qu'il y a très peu de différence entre les facteurs de 0,1, 0,15 et 0,2 pour la contrainte transversale. Le graphique 30 présente une vue agrandie de la région près de la soudure. En prenant un  $k_t$  égal à 0,1 comme référence, le facteur 0,2 présente une erreur maximale de 4,2 %, tandis que le facteur de 0,15 présente une erreur de 1,2 %.



Graphique 29 Optimisation du facteur de temps  $k_t$



#### 4.4 Résumé

Dans ce chapitre, l'analyse de la convergence des différents maillages a été effectuée. Il en a découlé que le modèle le plus efficace pour effectuer la simulation de la plaque présentée à la figure 32 est le modèle utilisant la méthode du maillage par sections de la figure 40. L'analyse de la convergence des incréments de temps a permis de déterminer les incréments optimaux pour la solution du modèle. Tous ces paramètres seront maintenant utilisés dans le chapitre suivant afin de comparer les résultats de la modélisation par éléments finis du procédé de soudage avec les résultats d'essais en laboratoire.