

## Introduction

L'industrie crée chaque jour de nombreux produits constitués par des assemblages de pièces reliées entre elles par divers procédés de boulonnage, vissage, sertissage rivetage, soudage, ...etc. La modélisation du procédé de soudage impose beaucoup de complications, au vu de l'implication des couplages entre divers phénomènes d'ordre mécaniques, thermiques et métallurgiques. De point de vue thermique, des échanges de chaleur dépendent directement de l'interaction au point de contact choisi lors de la modélisation. C'est pourquoi il est important de bien comprendre et décrire les différents choix proposés par le logiciel concernant ce contact ainsi que tous les autres aspects comme les variations thermiques, les grandes déformations, les lois de comportement et de frottement. D'où il s'avère intéressant de dissocier chaque aspect et le restreindre afin de l'analyser et traiter l'influence de chacun sur toute la totalité de l'opération de soudage. [Wilson et al, 2012]

La simulation numérique du procédé de soudage demeure très difficile, dans la mesure où des phénomènes complexes thermiques, métallurgiques et mécaniques interviennent dans la zone affectée thermiquement lors du soudage. Afin de réaliser les simulations numériques avec des logiciels de calcul industriels, il est par conséquent courant de négliger certains phénomènes physiques, de simplifier la géométrie, ou de réduire la dimension du problème. C'est pour cela qu'il existe plusieurs codes de calcul par éléments finis qui permettent la réalisation de ce genre d'analyse et qui ont montré leurs efficacités. Parmi ces codes, on peut citer ABAQUS, ANSYS, SYSWELD .... Le choix d'utiliser l'un ou l'autre est guidé par les possibilités et les capacités qu'offre chacun dans la modélisation de ce genre de problème. Suite aux avantages fournis par le code ABAQUS et sa souplesse dans la manipulation, ce qui nous a poussé à l'adapter dans notre recherche. [Louetri, 2016]

Dans ce chapitre, des modèles numériques sont utilisés et sont basés sur la méthode des éléments finis pour développer un outil de calcul efficace et utile à travers le code du logiciel commercial ABAQUS [Deng et al, 2006]. Par conséquent, afin d'obtenir une prédiction de haute précision de la déformation de soudage, la distorsion de soudage et autres, les problèmes non linéaires doivent être soigneusement pris en compte dans ces modèles numériques. Remarquons, qu'il n'existe pas pour l'instant de modèle unique permettant de prendre en compte tous ces phénomènes simultanément. En outre, la puissance de calcul actuelle ne permet pas de coupler tous les phénomènes et de simuler toutes les échelles thermiques, physico-mécaniques. [Liang et al, 2018]

Il est important de bien comprendre et décrire les différents choix proposés par le logiciel concernant ce contact, dont les propriétés thermomécaniques utilisées sont comme la densité, le module de Young (E), le coefficient de poisson, la conductivité thermique, la chaleur spécifique et le coefficient de dilatation. La validation des modèles étudiés est établie, en tenant compte de tous ces paramètres ainsi que la complication du phénomène du soudage

### IV.1 Présentation du code de calcul ABAQUS

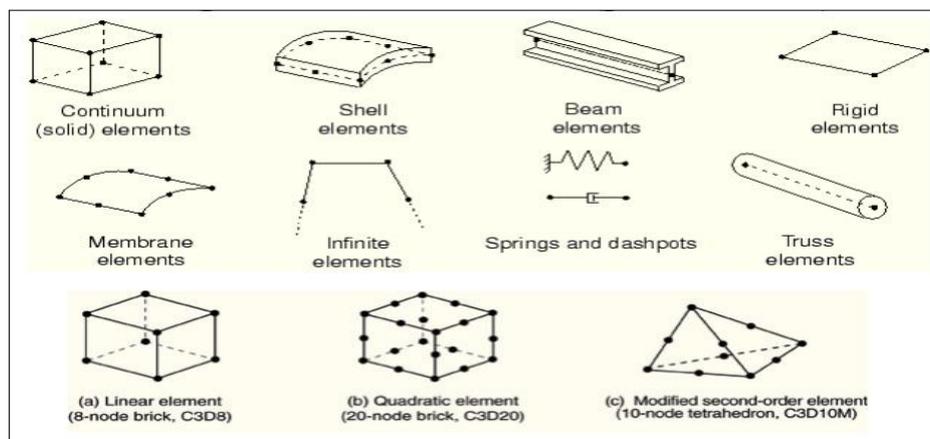
ABAQUS est un code de calcul créé en 1978, basé sur la méthode des éléments finis, à travers les méthodes numériques en résolvant les systèmes linéaires et non linéaires. Il se compose de trois produits (ABAQUS-standard, ABAQUS-Explicite et ABAQUS-CAE).

ABAQUS standard est un solveur généraliste qui a recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite. Il est dédié aux calculs quasi-statiques, linéaires ou non, thermiques, acoustiques, etc.... dont l'algorithme de calcul n'est qu'un calcul itératif visant à atteindre l'équilibre global du système à chaque incrément de temps. Le solveur ABAQUS explicite emploie un schéma d'intégration détaillé pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi-statiques non-linéaires. Contrairement au code implicite, l'algorithme explicite n'est pas itératif avec un très grand nombre d'incrémentes très courts et il est défini par la vitesse de propagation d'une onde élastique. La notion de propagation d'onde présente l'avantage de limiter la résolution aux éléments atteints par l'onde ce qui présente une économie par rapport au code implicite. En résolvant sur la totalité du système à chaque incrément, cela lui confère la capacité de réaliser des calculs rapides. Le module explicit est toutefois confronté à deux difficultés qui résident en la stabilité des calculs et en plus des modes vibratoires.

ABAQUS-CAE constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs, chacun de ces produits est complété par des modules additionnels, spécifiques à certaines applications. Les produits ABAQUS notamment ABAQUS-CAE sont écrits intégralement avec les langages C++, Fortran vis-à-vis des parties de calcul et Python pour les scripts et les paramétrisations. La gestion de l'interface graphique est assurée par FOX Toolkit.

## IV.2 Différents types d'éléments disponibles dans la bibliothèque d'ABAQUS v.6.14

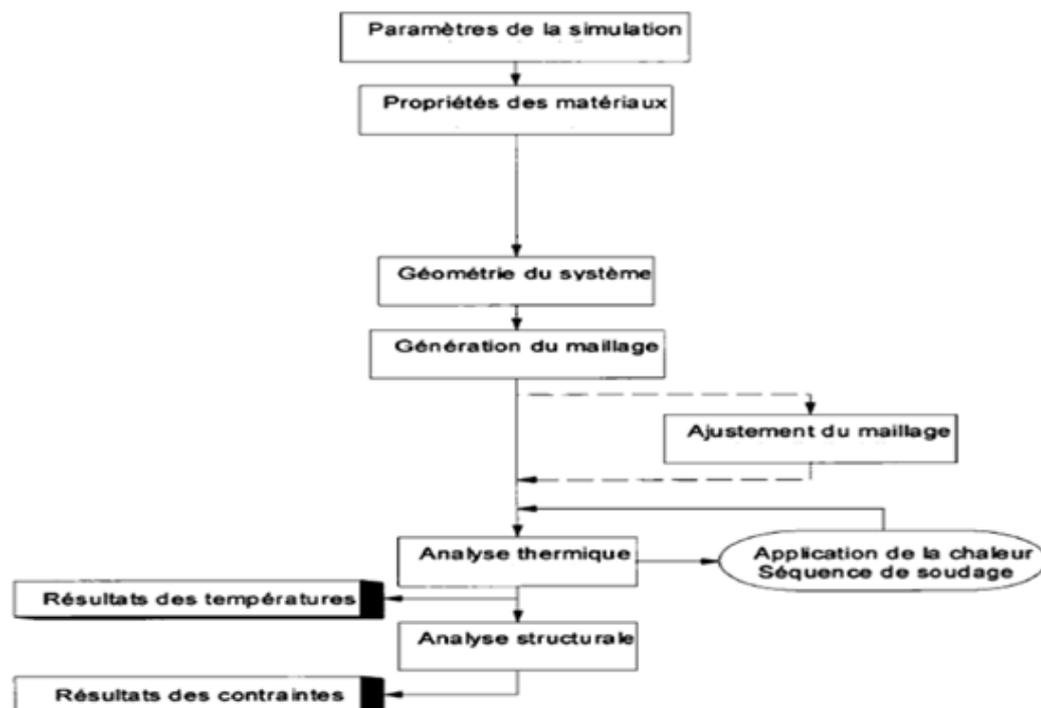
Comme tous les codes de calcul, ABAQUS est un logiciel qui dispose d'une multitude de types d'éléments qui diffèrent par leurs propriétés d'interpolation de degré de liberté, propriétés physiques, et de symétrie. Ce code propose ainsi des éléments linéaires (1D) des connecteurs, et également des éléments à 2 et 3 dimensions (2D et 3D). Le choix entre ces différentes dimensionnalités dépend de la maîtrise du problème à simuler, ce qui permet de tenir compte de la symétrie géométrique, le type de chargement, les conditions aux limites et les propriétés des matériaux.



**Figure IV.1** Divers éléments disponibles dans la bibliothèque d'ABAQUS [Hibbitt et al, 2014]

### IV.3 Description des modèles numériques étudiés

Pour affronter le problème de réparation et de renforcement dans le domaine des constructions métalliques, et afin d'assurer une durée d'exploitation prolongée en service d'un élément qui fait partie d'une structure en charpente métallique, la création d'un modèle numérique sous ABAQUS (version 6.14) est établie en introduisant au début les caractéristiques géométriques en trois dimensions 3D, en plus du type et modèle (base feature) associé à l'élément. Dépendant du mode d'analyse (thermique, mécanique, hydraulique..), les propriétés du matériau utilisé sont sélectionnées. L'assemblage est la pose de l'élément de base et celui du renforcement (poutre, cornière) sans entamer aux interactions. La définition de l'analyse (Step) est en réalité « statique ou dynamique, linéaire ou non linéaire, viscosité, couplage entre les analyses de la thermique et la mécanique... ». Elle doit être compatible avec les propriétés qu'on vient de définir, cette analyse est accompagnée de l'incrément du temps de calcul. L'étape la plus importante dans la modélisation est celle du choix du type de l'interaction, elle comprend l'introduction du type de l'interaction lui-même, autrement dit le type de contact (contact par frottement, contact par boulon, contact par adhérence parfaite (Tie), ou contact par soudure ...). Le chargement du modèle renforcé comporte le type de chargement extérieur d'une part, et d'autre part les conditions aux limites « articulé, libre, encastré, appuyé....etc.). Par ailleurs, l'opération du maillage est établie en se basant sur la méthode des éléments finis MEF bien évidemment, qui est en fait la discrétisation par des éléments infinitésimaux. A ce stade, le module **Job** est celui qui gère le passage du calcul de simulation, et le dernier s'occupe de l'exploitation des résultats sous formes de diverses visualisations. La simulation numérique thermo-mécanique sous Abaqus est basée sur l'organigramme présenté ci-dessous en Figure IV.2.



**Figure IV.2** Cas général de l'organigramme séquentiel de la modélisation thermomécanique sous ABAQUS [Morin, 2006]

**IV.4 Etude numérique du renforcement des éléments métalliques sous ABAQUS**

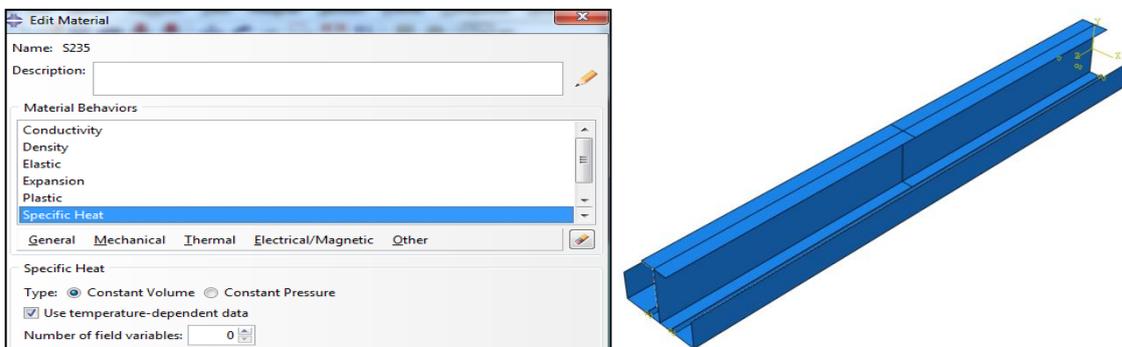
**IV.4.1 Etude de poutres**

Pour la validation de l'étude expérimentale, une analyse thermomécanique est envisagée sous ABAQUS v 6.14 ; on a pris un élément type poutre en profilé laminé (IPE 100) renforcé par soudage par deux cornières à ailes égales de 50x50x5 mm au niveau de la semelle inférieure.

L'essai retenu est l'essai de flexion 03 points (ASTM A370 ou ISO 15630-1). Afin d'évaluer l'influence du champ de température dû à l'opération de soudage, deux types de cordons sont utilisés, à savoir cordons continus et discontinus. Les propriétés thermomécaniques utilisées comme début de modélisation pour les poutres renforcées sont la densité ( $\gamma=7850\text{kg/m}^3$ ), le module de Young (E), le coefficient de poisson, la limite d'élasticité, la conductivité thermique, la chaleur spécifique et le coefficient d'expansion thermique. Ces propriétés thermomécaniques sont identiques, que ce soit pour l'élément de base ou celui de renforcement, et elles sont caractéristiques aux aciers S 275. L'acier est modélisé comme un matériau thermo-élastique-plastique avec durcissement par contrainte isotrope, qui est supposée dépendre de la température, et les autres paramètres. Le module de Young et la limite d'élasticité sont faibles et finis à des températures élevées. (Tableau IV.1) (Figure IV.3)

**Tableau IV.1** Constantes thermiques des matériaux utilisés dans les modèles à éléments finis. [Zhang et al, 2019]

Température	Module de Young	Contraintes limites	Coefficient d'expansion thermique	Coefficient de conductivité thermique	Chaleur spécifique
°C	210000 MPa	235 MPa	$\times 1,2e-5\text{m}/^\circ\text{C}$	$\times 40\text{W}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$	$\times 500\text{J}/\text{kg }^\circ\text{C}$
0	1,000	1,000	1,000	1,0	1,00
300	0,800	0,850	0,900	0,9	0,85
500	0,500	0,700	0,800	0,8	0,75
800	0,100	0,100	0,900	0,7	0,60
1000	0,001	0,001	1,300	2,0	3,00
3000	0,001	0,001	1,300	2,0	3,00



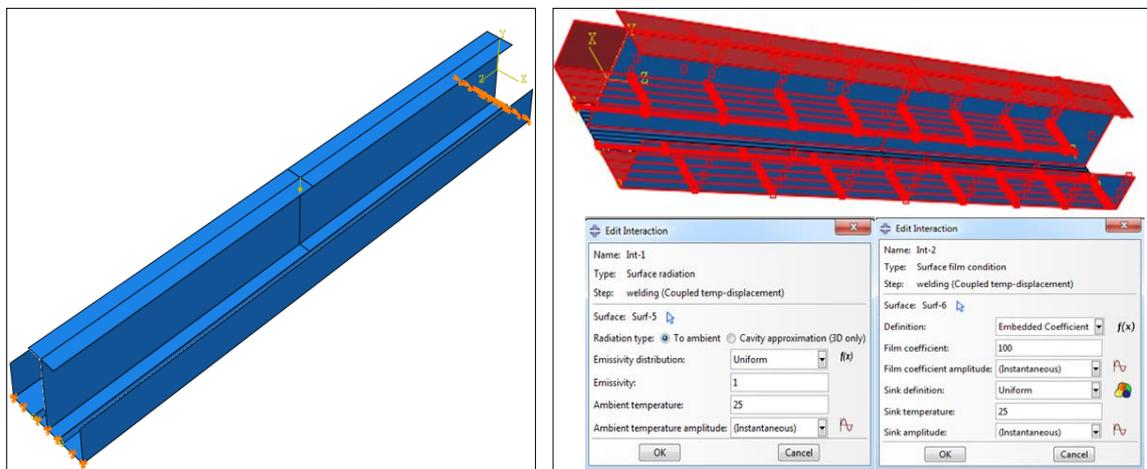
**Figure IV.3** Introduction des propriétés thermomécaniques des poutres renforcées sous ABAQUS

La réalisation des joints soudés se fait à l'aide de cordons de soudure qui se différencient selon leurs positions spatiales et selon le type de joint soudé. Pour le raccordement de l'élément de

base (poutre IPE) avec les éléments de renforcements (cornières) on a utilisé 2 types de soudures. Il convient de prendre la résistance de ce genre de soudure à pleine pénétration égale à la résistance de calcul associée à la plus faible des pièces assemblées, à condition que la soudure soit réalisée au moyen d'un métal d'apport qui permet d'obtenir des éprouvettes de traction entièrement soudées possédant une limite d'élasticité et une résistance à la traction minimale au moins égales à celles spécifiées pour le métal de base. Il est à noter que les propriétés du cordon de soudure sont prises identiques au métal de la poutre.

La poutre renforcée est simplement appuyée, les conditions aux limites se traduisent de ce fait par un blocage des déplacements au niveau du premier appui où on a ( $U_x=U_y=U_z=0$ ). Par contre un blocage des déplacements et de rotation qui assure ( $U_x=U_y=R_x=0$ ), le chargement extérieur est de flexion et présenté par une charge concentrée appliquée au milieu de la semelle supérieure et dont l'intensité varie à partir de  $P=10000$  N.

Le module interaction est obligatoire car il permet d'associer à la paire de contact, une des interactions définies dans le modèle. Pour notre simulation thermomécanique deux interactions sont définies qui sont la surface de radiation en plus du film condition (convection). Pour tenir compte des pertes de chaleur, le rayonnement thermique et le transfert de chaleur sur la surface de la soudure ont été pris en compte. Les pertes de rayonnement sont dominantes pour les températures plus élevées près et dans la zone de soudure simultanément d'une part, et d'autre part les pertes par convection des températures plus basses loin de la zone de soudure. Il est d'usage d'utiliser des conditions aux limites thermiques combinées afin d'éviter les difficultés associées à l'utilisation de l'énergie thermique. 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. (Figure IV.4)

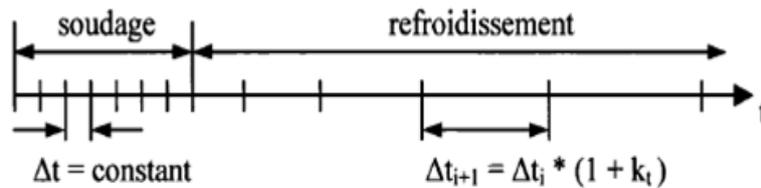


**Figure IV.4** Conditions aux limites, chargement et interaction thermomécanique de la poutre renforcée sous ABAQUS

Pour l'analyse de la convergence (STEP), deux incréments de temps différents qui sont le soudage et le refroidissement utilisés dans la simulation thermique et structurale de l'opération de soudage. La procédure de soudage implique des gradients thermiques très élevés, un incréments 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.

L'analyse de transfert de chaleur permet d'obtenir l'historique des températures. La formulation considère les contributions du champ des températures transitoires ainsi que les propriétés thermo-physiques dépendantes de la température. (Figure IV.5) [Attarha et al, 2011]



**Figure IV.5** Incréments de temps de l'opération de soudage de la poutre renforcée sous ABAQUS

Le maillage utilisé représente un bon compromis entre le temps de calcul et la précision des résultats. Le raffinement du maillage dans la région de la soudure entraîne une augmentation considérable du nombre de degrés de liberté. Afin de limiter cette augmentation, la technique du remaillage peut être utilisée. Elle consiste à raffiner uniquement le maillage aux environs de la source de chaleur, et non plus sur toute la longueur de la soudure. La zone raffinée se déplace à la même vitesse que la source de chaleur. Comme on a déjà mentionné au deuxième chapitre, Rebrov propose l'application d'un champ de température constant lors de l'opération de soudage qui atteint 1200° C pour les poutres PRSC, dont on a intégré une température de 1200° C en phase de soudage (Step Manager- Welding) qui diminue jusqu'au refroidissement (Cooling- Ambiante environ 25° C). Par la suite Abaqus envisage la distribution de la chaleur sur les métaux soudés automatiquement, sans afficher les calculs dans chaque point.

Pour l'analyse thermomécanique la poutre IPE et ses renforcements sont modélisés en se référant à la bibliothèque d'ABAQUS et selon une étude de cas proposé par celui-ci. Dans l'analyse thermo mécanique on fait appel à cet effet à des éléments du type S8RT, dont S8RT: Coque épaisse à 8 nœuds quadrilatère thermiquement couplée, déplacement biquadratique, température bilinéaire à la surface de la coque.

De la même manière que la poutre, le cordon de soudure est modélisé comme un élément solide C3D20RT c'est-à-dire une brique à 20 nœuds couplée thermiquement, brique à huit thermiquement couplée, avec un déplacement trilineaire et température trilineaire. (Figure IV.6)

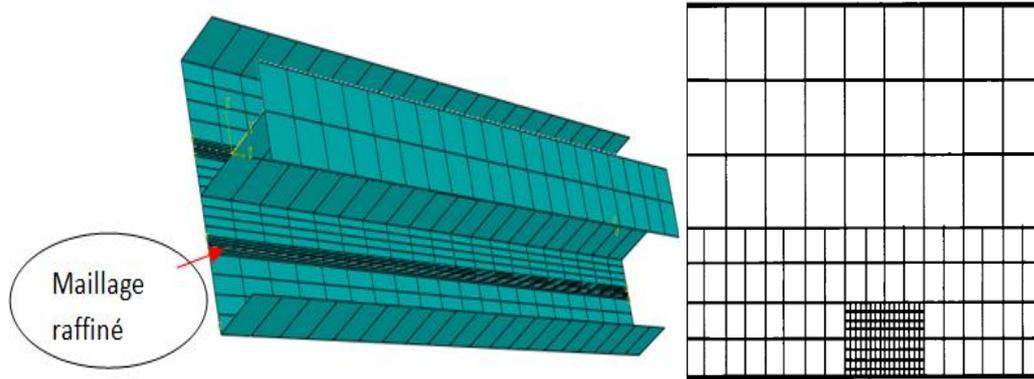
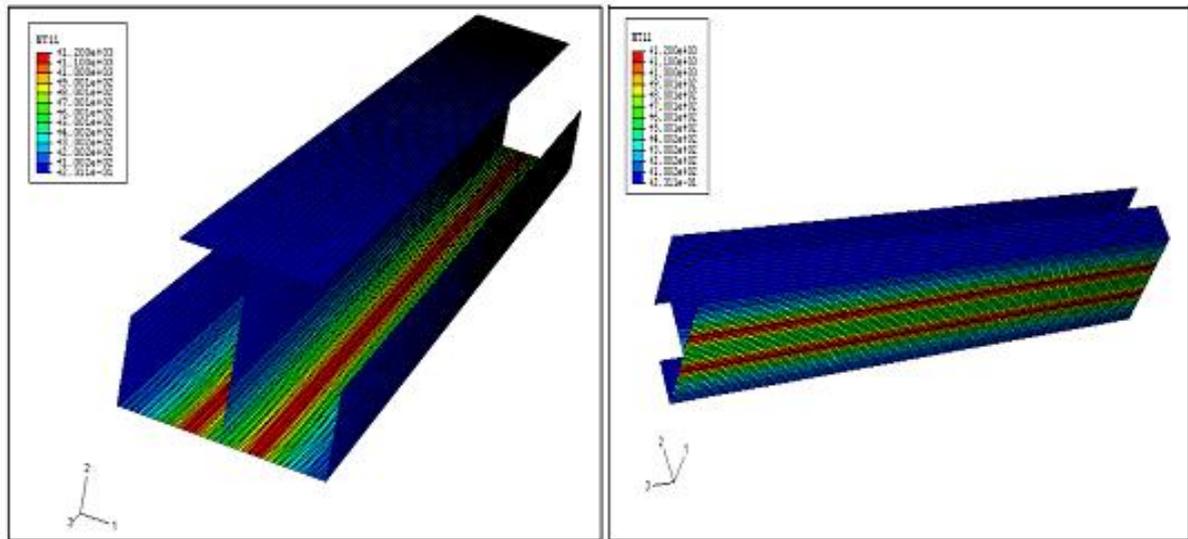
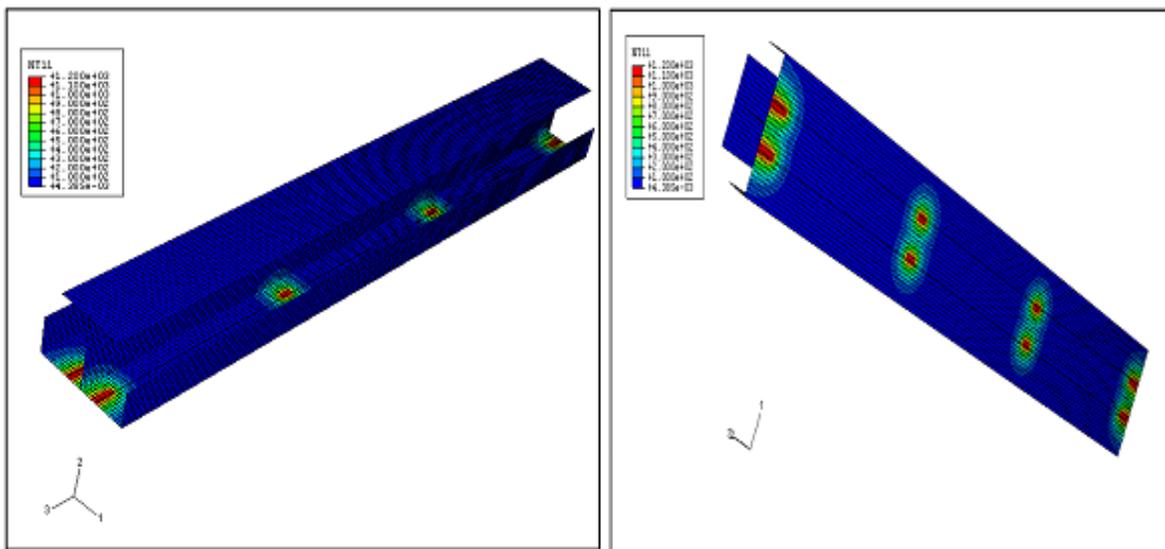


Figure IV.6 Maillage de la poutre renforcée sous ABAQUS [Morin ,2006]



(a) Distribution de la température dans l'élément renforcé : cas du cordon continu



(b) Distribution de la température dans l'élément renforcé : cas du cordon discontinu

Figure IV.7 Distribution de la chaleur sur les métaux soudés dans l'élément renforcé sous ABAQUS

La détermination de la 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. Ce qui provoque une distribution irrégulière de la température dans l'espace et dans le temps, ayant une influence directe sur les caractéristiques mécaniques et physiques du métal Figure IV.7

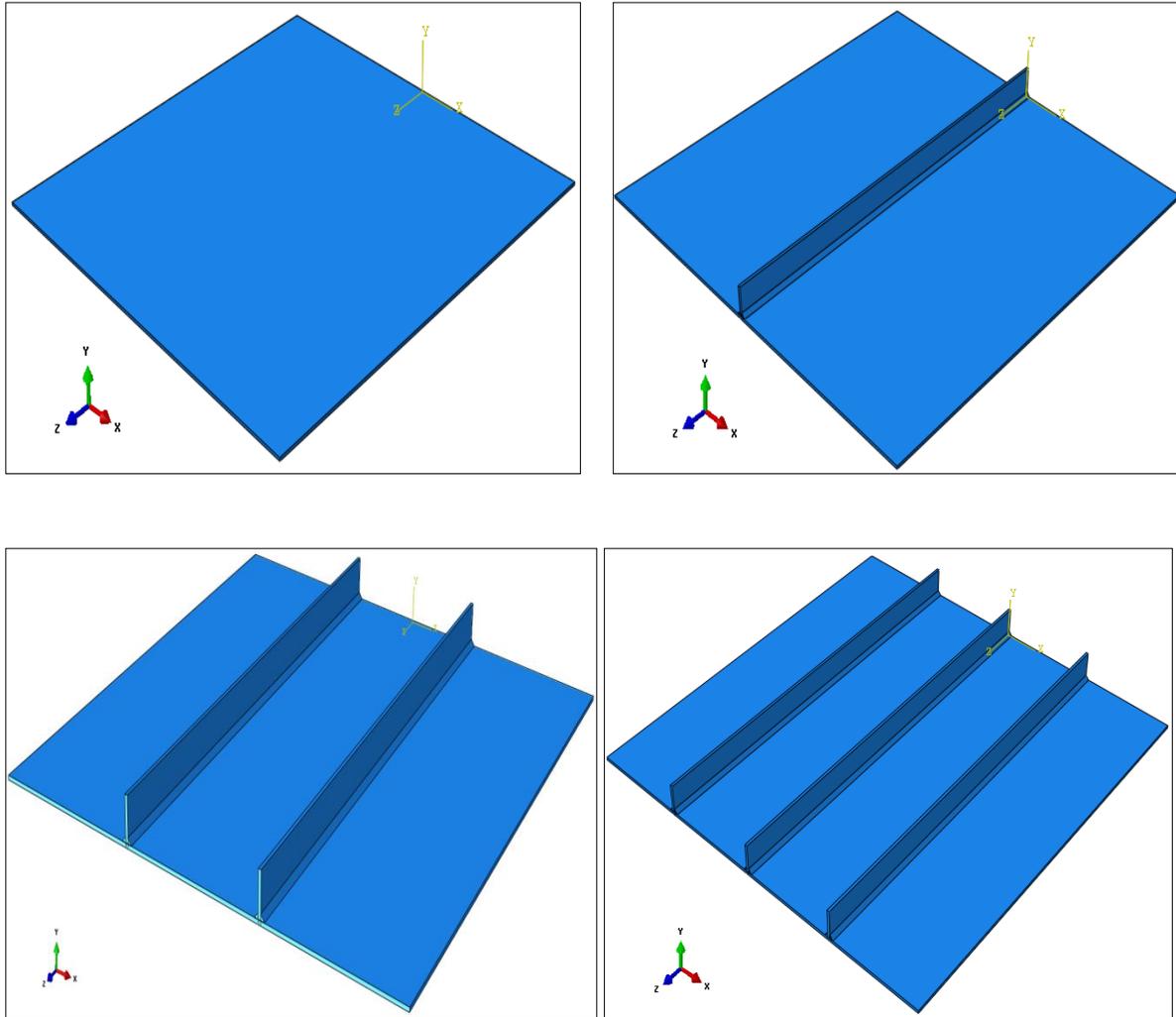
#### IV.4.2 Etude des plaques

Les simulations numériques par la méthode des éléments finis MEF deviennent un outil particulièrement intéressant pour la prédiction des contraintes et des déformations résiduelles d'une opération de soudage. Cependant, la détermination de ces contraintes et déformations présente des difficultés majeures car les phénomènes mis en jeu sont nombreux et complexes. Généralement, cela nécessite une modélisation du couplage des phénomènes thermiques, métallurgiques et mécaniques dans la zone affectée thermiquement des structures soudées, particulièrement pour la modélisation de la source de la chaleur [Trinh, 2006]. La solution d'analyse par MEF optimise le prototypage virtuel et la simulation numérique nécessite l'utilisant des hypothèses de la mécanique de rupture en élasticité et éventuellement en dynamique. Ainsi elle améliore les performances des composants, des matériaux et des produits sujets à de fortes exigences opérationnelles (sécurité, endommagement...). En outre, les données du matériau intervenant dans le calcul, dépendantes de la température, sont difficiles à obtenir, surtout pour les hautes températures. Par conséquent, le niveau de qualité de la solution numérique est difficile à maîtriser, lorsqu'il s'agit d'une simulation de l'opération de soudage [Benadla, 2005].

Des modèles numériques sont construits avec le logiciel ABAQUS v6.14, où la source de chaleur de l'opération de soudage est définie par la création des amplitudes décrivant le passage d'une source de chaleur. Ces modèles ont subi une série d'analyses diverses, la première est l'analyse thermique qui est l'étude de l'influence de la température de soudage sur les éléments à assembler. En plus, de l'analyse mécanique non linéaire, où l'étude de l'influence de la charge uniformément répartie sur les pièces renforcées et non renforcés a été envisagée. D'autre part, une analyse thermo-mécanique avec un couplage entre les deux types d'analyses précédentes (thermique et mécanique), autrement dit l'élaboration de la soudure en présence d'un chargement mécanique (renforcement sous charge). La solution par MEF de l'analyse thermo-élastique-plastique couplée séquentiellement peut être divisée en deux étapes. Tout d'abord, l'exécution du transfert de chaleur pour acquérir le champ de température transitoire pendant le processus de soudage. Ensuite, l'application des résultats associés à l'analyse thermique précédente en tant qu'un chargement de type externe sur le modèle mécanique. Un rétrécissement thermique non uniforme et la dilatation du matériau induisent une réponse structurale y compris des contraintes, déformation et déformation plastique.

La déformation structurelle causée par le soudage dépend des facteurs de conception et de fabrication. Ces facteurs sont importants et incluent les propriétés des matériaux dépendant de la température, types de joints de soudure, épaisseur et dimensions des tôles etc... Par contre ces facteurs de fabrication comprennent la méthode et la vitesse de soudage, l'apport de chaleur, la séquence de soudage, les conditions aux limites mécaniques et la stratégie d'assemblage. [Zhang et al, 2019]

L'élément solide tridimensionnel est utilisé pour améliorer la précision de la modélisation et le calcul sur la base du code ABAQUS. D'où, une méthode utilisée par MEF avec une analyse thermo-élastiques-plastiques couplés séquentiellement, pour l'estimation de l'influence de soudage sur l'état des contraintes résiduelles et déformations des panneaux raidis. (Figure IV.8)



**Figure IV.8** Présentation des modèles d'étude sous ABAQUS v 6.14

(a) Plaque non raidie ; (b) Plaque avec un seul raidisseur ;(c) Plaque avec deux raidisseurs, (d) Plaque avec trois raidisseurs

Dans une structure ou dans un joint soudé en tôle mince, les comportements mécaniques du soudage, tels que les contraintes résiduelles et les déformations produites pendant le processus d'assemblage ont des caractéristiques fortement non linéaires. Comme il est indiqué dans le tableau IV.1 cité ci-dessus, les propriétés du matériau (Module de Young  $E$ , de la limite d'élasticité  $f_y$ , coefficient de conductivité thermique et de la chaleur spécifique) dépendent de la température, ils auront une influence sur les résultats de la simulation mécanique et thermique. [Zhang et al, 2019]

Pour le modèle mécanique adapté, la soudure est un cordon d'angle (Figure IV.9). Pour la modélisation numérique non linéaire des plaques munies de raidisseurs, ces derniers sont assemblés avec deux cordons de soudure continue soudés simultanément et traités par ABAQUS v6.14.

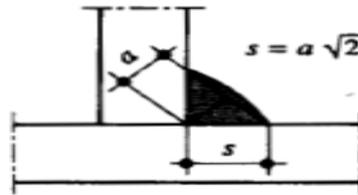


Figure. IV.9 L'épaisseur utile ou gorge "a"

$t = 5 \text{ mm}$  ;  $a = 4 \text{ mm}$

a: L'épaisseur utile ou gorge "a" d'une soudure d'angle sera prise égale à la hauteur du plus grand triangle pouvant être inscrit entre les faces de fusion et la surface du cordon mesurée perpendiculairement à son côté extérieur.

l: longueur utile d'un cordon de soudure et égale à sa longueur réelle diminuée de la longueur des cratères d'extrémité lorsque aucune disposition n'est prise pour les éliminer.

Les conditions aux limites appliquées se traduisent par une articulation sur chaque bord aux extrémités des plaques avec ( $U_x = U_y = U_z = 0$ ), ( $\theta_x, \theta_y$  et  $\theta_z \neq 0$ ). Le chargement est uniformément repart de flexion d'intensité  $q = 0.01 \text{ N/mm}^2$  comme présenté sur la figure IV.10.

Pour l'étude thermomécanique un champ thermique mobile est appliqué combiné avec l'application simultanée d'un chargement mécanique extérieur réparti. Ce choix est pris en concordance avec la recherche bibliographique concernant bien évidemment la réhabilitation des structures métalliques. Là où on trouve les propositions offertes par plusieurs chercheurs dans ce domaine qui proposent de renforcer l'élément sans le décharger. [Yossef, 2015] ; [Vild et al, 2017] ; [Al Alia et al, 2017]

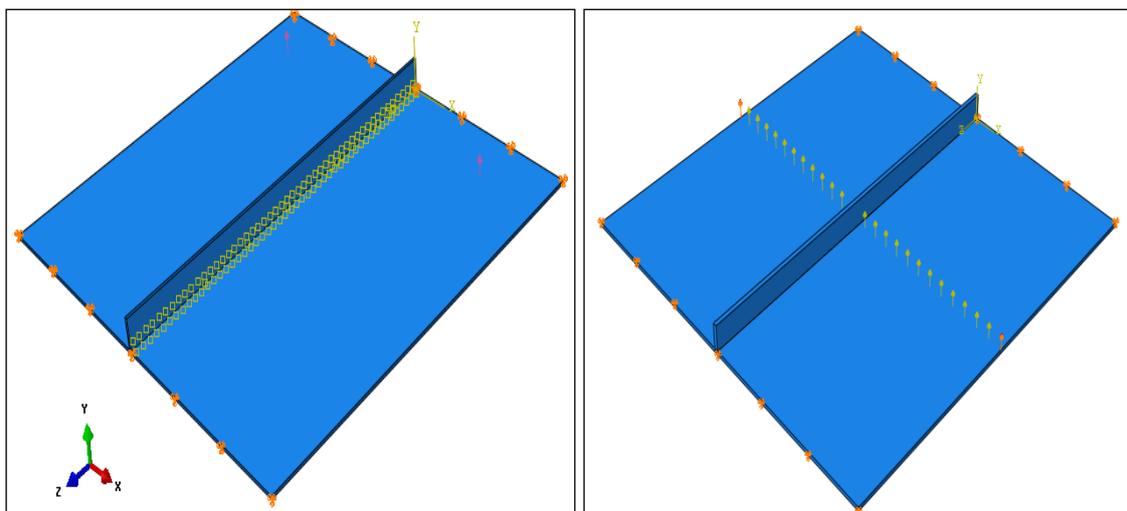
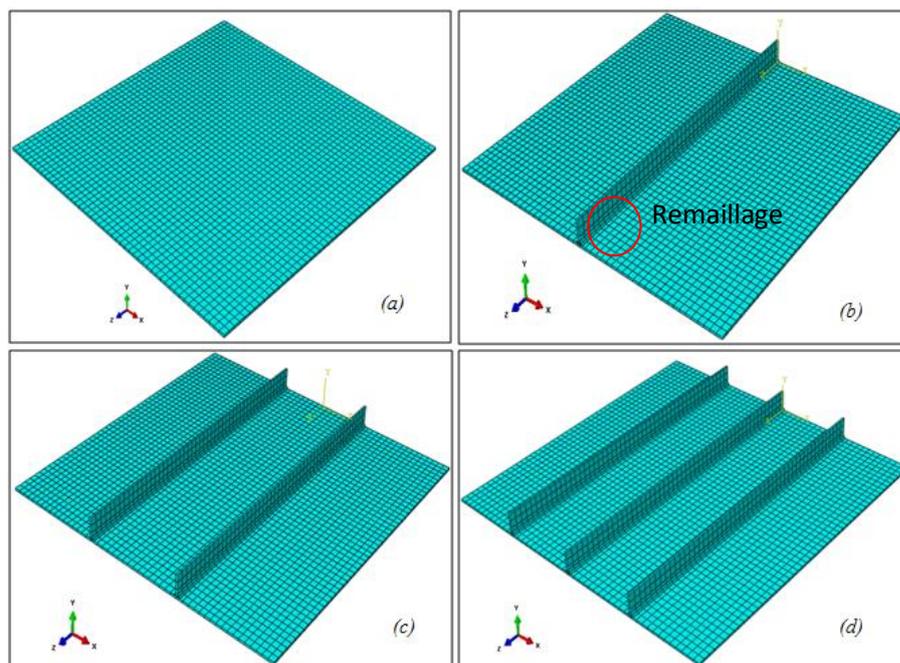


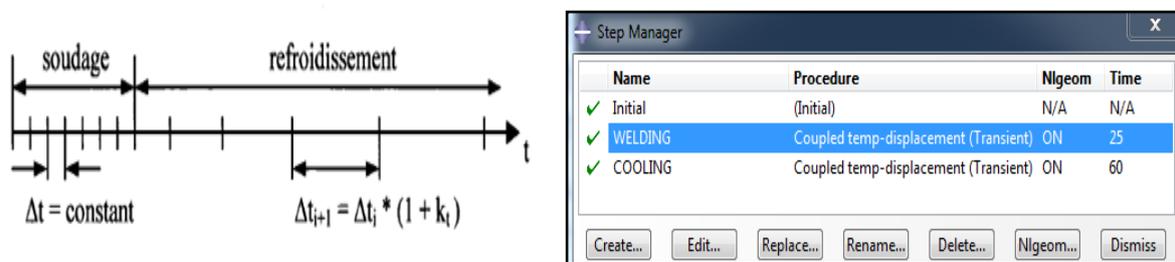
Figure IV.10 Mode de chargement et conditions aux appuis sous ABAQUS v6.14

Le maillage est envisagé par élément, le maillage de la plaque non raidie est présenté par des éléments de type C3D20R à brique quadratique à 20 nœuds et intégration réduite, cela signifie un élément de maillage sous forme d'une brique linéaire à huit nœuds.

Pour le modèle thermo-mécanique, le maillage du panneau raidi est défini par des éléments solides de type est C3D20RT c'est-à-dire une brique à 20 nœuds thermiquement couplée, avec un déplacement triquadratique et la température trilineaire. Le nombre de mailles de l'ensemble des modèles raidis avec un, deux et trois raidisseurs est de 2700, 2850, 3000 mailles respectivement. Des mailles affinées (remaillage) sont utilisées dans la zone du cordon de soudure pour obtenir des flux thermiques plus précis et obtenir une température optimale. La taille de l'élément de maillage augmente progressivement en s'éloignant de la zone de soudage. La division des mailles de l'ensemble du modèle est illustrée à la figure IV.11. (A)



(A) Maillage des modèles sous ABAQUS v6.14.



(B) Incrément de temps de l'opération de soudage.

**Figure IV.11** Incrément de temps de l'opération de soudage et maillage des modèles sous ABAQUS 6.14

(a) Plaque non raidie ; (b) Plaque avec un seul raidisseur ; (c) Plaque avec deux raidisseurs, (d) Plaque avec trois raidisseurs

Deux incréments de temps qui sont « le soudage » et « le refroidissement » utilisés dans la simulation thermique et structurale de l'opération de soudage (Figure IV.11. (A)).

Pour l'analyse de transfert de chaleur et l'historique des températures, d'où on considère toutes les propriétés thermo-physiques dépendantes de la température [Attarha et al, 2011]. Une représentation précise de la source de chaleur et la sélection appropriée des paramètres corrélés sont indispensables à la simulation numérique des panneaux renforcés soudés à paroi mince. Le modèle de source de chaleur de soudage contient principalement la source de chaleur en ligne, la source de chaleur surfacique, la source de chaleur volumétrique, et la source de chaleur combinée (ligne, surfacique, volumique). Plusieurs chercheurs ont proposé que les paramètres de la source de chaleur gaussienne soient bien adaptés aux différentes vitesses de soudage et permettent de reproduire une largeur et une épaisseur précise de la soudure dont les formules de cette méthode sont présentées dans le chapitre 02.

En revanche une source de chaleur à double ellipsoïde est possible d'être utilisée, cette distribution est proposée par Goldak, dont les formules sont associées également au chapitre 2. Dans le présent travail la distribution de la densité de la source de chaleur au niveau du premier point d'arc de soudage est décrite par un modèle de source de chaleur mobile. Elle est utilisée sous ABAQUS au moyen d'un fichier Excel importé (Subroutine), ce dernier contient des calculs (Température -Temps) pour chaque élément intégrant dans la ligne de soudure. Ce calcul est basé essentiellement sur une combinaison de la méthode de Rebrov et celle non linéaire des moindres carrés. L'itération atteint cinquante 50 éléments, avec vingt cinq 25 secondes pour le temps de l'application de soudure et un temps de refroidissement de 60 secondes (en totalité 85 secondes). (Figure IV.12).

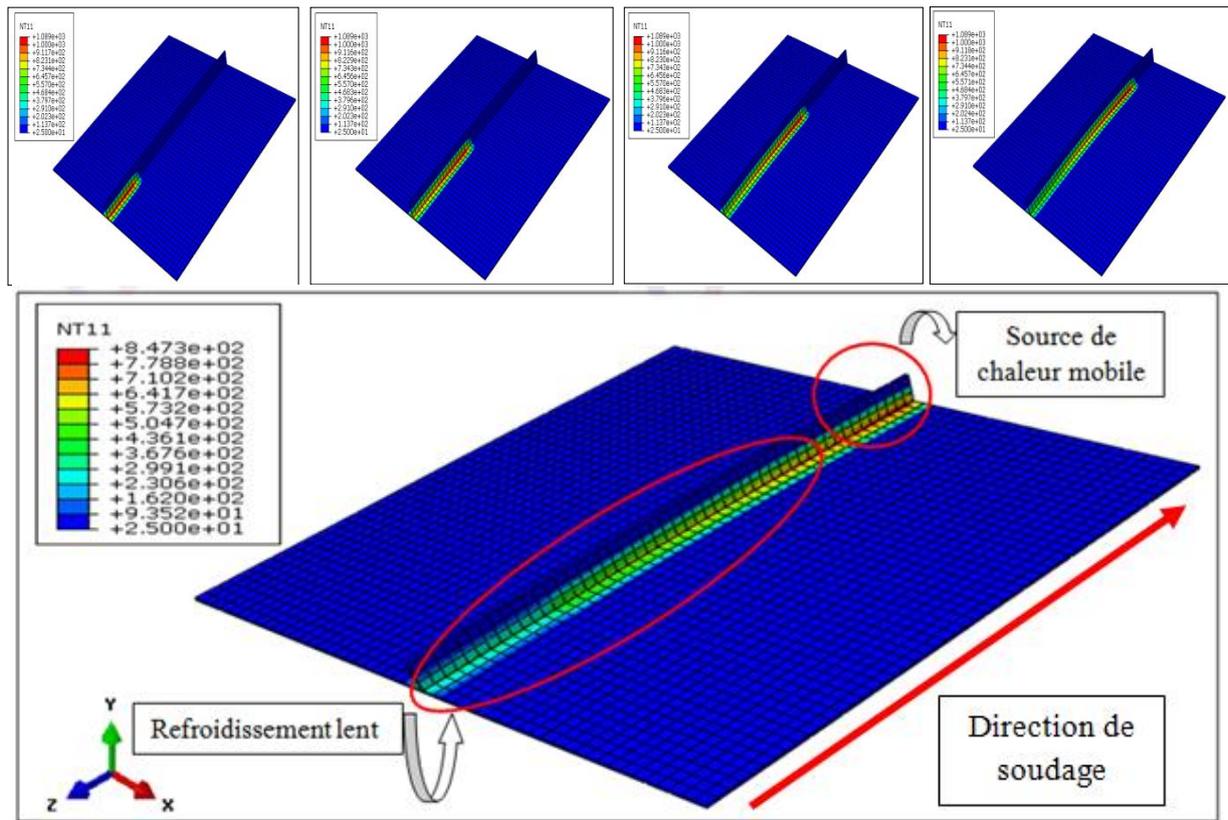
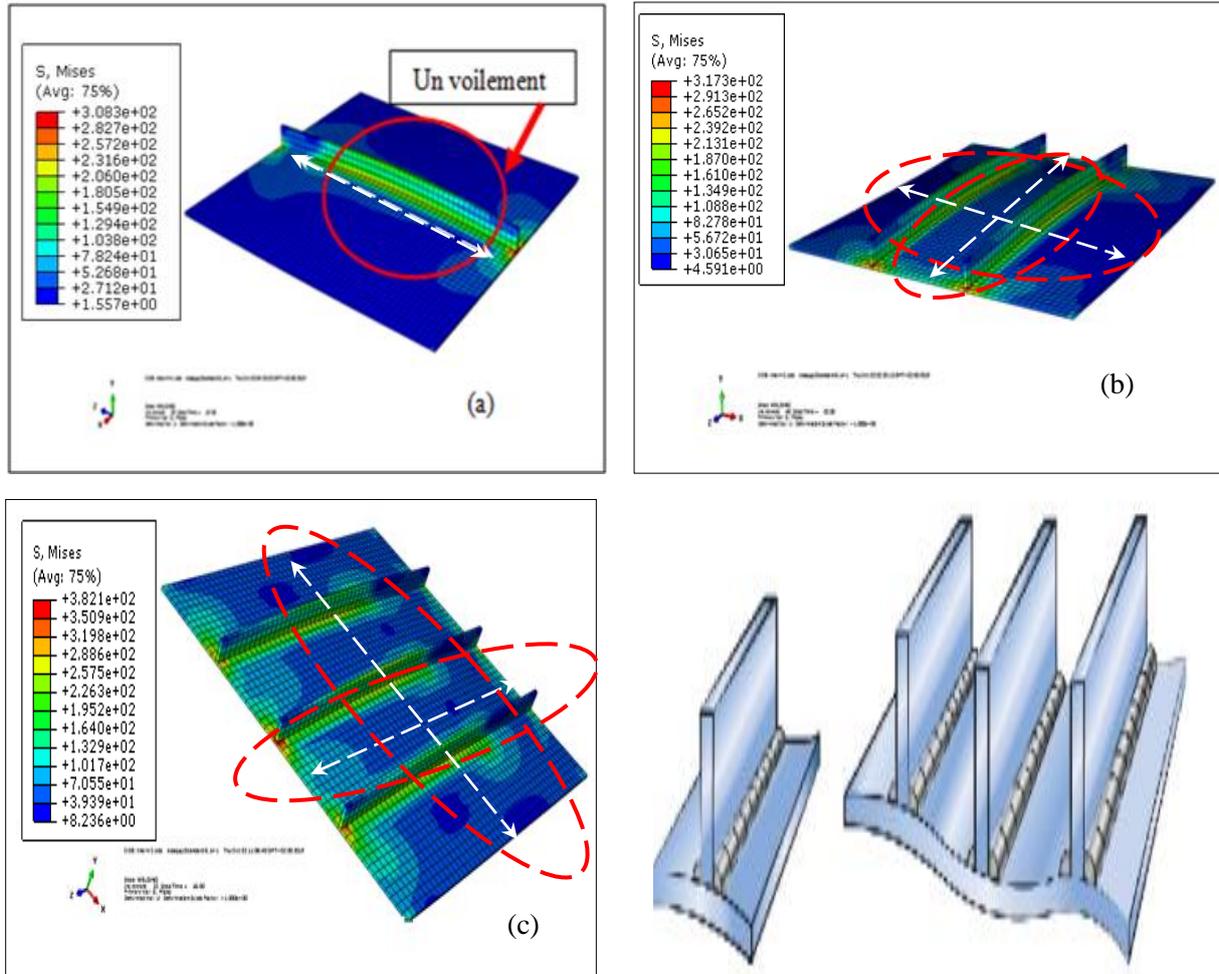


Figure IV.12 Source de chaleur mobile lors de l’opération de soudure sous ABAQUS

Il est à noter que pendant le processus de soudage, de fortes contraintes de traction longitudinales sont apparues dans la zone de soudure et à proximité du joint et sur la plaque. Tandis que certaines contraintes de compression sont générées dans les régions loin de la ligne de soudage. En principe, les contraintes de compression sont la raison principale de la déformation par voilement des pièces soudées due au chauffage (plaque). Alors il est difficile de calculer théoriquement la contrainte de compression critique parce que la distribution des contraintes résiduelles de soudage est non uniforme.

On voit clairement dans la figure IV.13 que l’opération de soudage provoque une courbure des plaques raidies en offrant ainsi une concavité de ces éléments (cloquage), par conséquent on déduit la présence des contraintes résiduelles dans les deux sens longitudinal et transversal simultanément. C’est pour cela, un examen du phénomène d’instabilité est nécessaire concernant le voilement des plaques fléchies, en mettant en évidence les principaux paramètres qui régissent ce phénomène, ainsi que la présentation de la théorie linéaire du voilement élastique.



**Figure IV.13** Contours de contrainte résiduelle de la plaque raidie (N/mm<sup>2</sup>) au niveau de la zone de soudure et la zone affectée thermiquement

(a)-- Plaque avec un seul raidisseur ; (b)- Plaque avec deux raidisseurs, (c)-Plaque avec trois raidisseurs

#### IV.4.3 Le comportement au voilement de plaques planes avec des conditions aux limites classiques

Pour une faible contrainte  $\sigma_x$ , une déformation  $\omega$  hors du plan lui correspond lors d'application d'un faible chargement dans le domaine élastique. Pour une certaine contrainte  $\sigma_x$  plus importante et qui dépasse la contrainte critique du voilement élastique  $\sigma_{crB}$ , la plaque garde sa déformation et elle forme notamment une cloque (figure IV.14.b). Elle présente de ce fait un déséquilibre (métastable) et on dit qu'elle a voilé. Par ailleurs, en cas de dépassement de  $\sigma_{crB}$ , les fibres comprimées sont retenues par les fibres perpendiculaires qui sont tendues. Dans un modèle plan, tout se passe comme si des ressorts empochaient les fibres comprimées de se déformer librement (figure IV.14.c). [Hirt et al, 1992]

La théorie classique des plaques suggère qu'une plaque se déformera en un mode dont la forme dépend du rapport de format, du chargement appliqué et des conditions aux limites. La formule IV.1 définit la contrainte critique pour une plaque chargée axialement (de largeur  $b$  et

de longueur a), donnant une forme de mode constituée d'un motif continu constitué d'un nombre entier de demi-ondes sinusoïdales (de longueur l) dans chaque direction orthogonale. En revanche, le voilement élastique n'exprime pas la ruine des plaques, et en cas de continuité de chargement des plaques déjà voilées, elles résistent davantage contrairement aux barres isolées, pour lesquelles le flambage signifie la ruine. [Hirt et al, 1992]

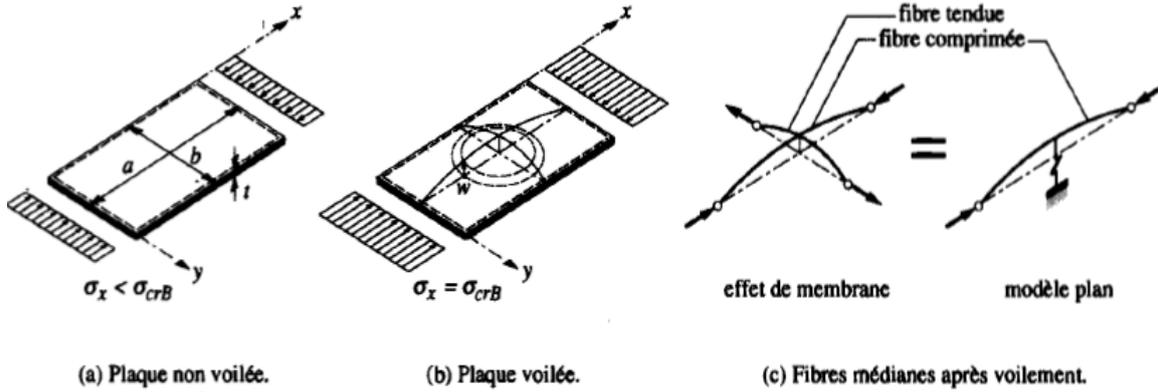


Figure IV.14 Voilement d'une plaque

Dans la théorie linéaire du voilement élastique, on peut calculer la valeur de la contrainte critique de voilement élastique  $\sigma_{crB}$  en se basant sur les hypothèses où la plaque est parfaitement plane à l'état initial et les déformations hors du plan sont faibles au cours du voilement, la plaque est sollicitée dans son plan moyen, et le matériau considéré étant infiniment élastique linéaire. D'où l'état d'équilibre de la plaque déformée (équilibre indifférent) peut être exprimé par l'équation différentielle suivante:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 2 \frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} + \frac{d^4 w}{dy^4} = \frac{N_x}{D} \frac{d^2 w}{dx^2} \tag{IV.1}$$

$w$  : Déformation de la plaque, perpendiculairement à son plan

$N_x$  : Effort normal par unité de longueur ( $N_x = \sigma_x t$ ), ( $D = \frac{t^3}{12(1-\nu^2)}$ )

$D$  : Rigidité de la plaque pour une largeur b unitaire

$t$  : Epaisseur de la plaque

$\nu$  : Coefficient de contraction latérale (Poisson)

En supposant que la plaque se déforme selon une surface de forme sinusoïdale représentée par l'équation :

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \sin \frac{m \pi x}{a} \sin \frac{n \pi y}{b} \tag{IV.2}$$

$m$  : nombre de demi-ondes (cloques) dans le sens x

$n$  : nombre de demi-ondes (cloques) dans le sens y

On peut calculer la charge critique de voilement élastique  $N_{crB}$  en substituant la valeur de  $w$  (IV.2) dans (IV.1). En tenant compte des conditions de bord de la plaque:

$$N_x = \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 \frac{\pi^2 a^2 D}{m^2} \tag{IV.3}$$

La valeur  $N_{crB}$  cherchée correspond au minimum de la fonction de  $N_x$  donnée par la formule (IV.3). Celui-ci est obtenu pour une valeur  $n = 1$ , ce qui veut dire qu'il n'y aura qu'une seule demi-onde (ou une seule cloque) dans le sens  $y$ , mais qu'il peut y en avoir plusieurs dans le sens  $x$ . En remplaçant la rigidité de la plaque  $D$  par sa valeur et en posant  $\alpha = a/b$ , on obtient :

$$N_{crB} = \left(\frac{m}{\alpha} + \frac{\alpha}{m}\right)^2 \frac{\pi^2 E t}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (\text{IV.4})$$

D'où l'on tire la contrainte critique de voilement élastique :

$$\sigma_{crB} = \frac{N_{crB}}{t} \left(\frac{m}{\alpha} + \frac{\alpha}{m}\right)^2 \frac{\pi^2 E t}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (\text{IV.5})$$

En définissant le coefficient de voilement  $k$  par :

$$K = \left(\frac{m}{\alpha} + \frac{\alpha}{m}\right)^2 \quad (\text{IV.6})$$

Et la contrainte de référence d'Euler  $\sigma_E$  par la relation qui suit et qui ne dépend pas de la limite d'élasticité du matériau, mais de purement la géométrie (élancement  $\lambda = t/b$ ) de la plaque, en général:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E t}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (\text{IV.7.a})$$

Pour l'acier:

$$\sigma_E [N/mm^2] = 190\,000 \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (\text{IV.7.b})$$

La contrainte critique du voilement élastique donnée par la formule (IV.8) peut s'exprimer ainsi [Hirt et al, 1992]:

$$\sigma_{crB} = k \sigma_E \quad (\text{IV.8})$$

## Conclusions

Le développement mathématique et numérique du problème thermique du soudage nécessite une modélisation adéquate de la source de chaleur. Plusieurs méthodes de résolution ont été mises en œuvre. La résolution numérique en utilisant ces méthodes a permis la détermination des caractéristiques thermiques et la compréhension des phénomènes intervenant dans l'analyse thermique du procédé de soudage.

L'utilisation des modèles de simulation du soudage dans un cadre industriel est axée sur la prédiction des contraintes et déformations résiduelles. Pour cela, il est nécessaire d'identifier le chargement thermique imposé à l'assemblage au cours de l'opération de soudage et plus particulièrement d'estimer les dimensions du cordon de soudure. Notre objectif était de développer une source de chaleur prédictive qui permet d'estimer les dimensions d'un cordon pour des paramètres opératoires de soudage connus.

La validation des résultats numériques obtenus par l'application du modèle développé de la source de chaleur nécessite un recalage paramétrique et une comparaison avec des résultats expérimentaux prévus plus loin.