

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET METALLURGIE

ENSMM-annaba-



DÉPARTEMENT SCIENCE ET GÉNIE DES MATÉRIAUX

Mémoire de fin d'études

MASTER: Ingénierie des Surfaces

**THEME :**

**SIMULATION NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT  
THERMOMÉCANIQUE DU SOUDAGE D'UN ACIER  
HLE POUR LES TUBES SOUDÉE EN SPIRAL  
DESTINÉES AU TRANSPORT DES HYDROCARBURES**

Présenté par : - Mr FODILI Benslim

Encadré(e) par : - Dr N.MATOUGUI

Membres du jury : - Dr BELHANI.M

Président

- Dr CHIHAOUI

Rapporteur

Juin 2016

## Liste des figures

Figure I.1 : Solide soumis à des forces extérieures.....	4
Figure I.2 : Vecteur contrainte, contrainte normale et cisaillement.....	4
Figure I.3 : Composantes de la contrainte sur les trois facettes 1, 2, 3 au point $M$ (souvent représenté comme dans la figure b). Exemple : La facette 1 est soumise au vecteur contrainte $T_1(\sigma_{11}, \sigma_{21}, \sigma_{31})$ . Le premier indice repère la composante, le second définit la normale à la facette.....	5
Figure II.1 : Les étapes essentielles de fonctionnement d'ABAQUS.....	12
Figure II.2 : Les types d'éléments unidimensionnels et Bidimensionnels. A : Elément à une dimension. B : Eléments Quadrangulaires (type bidimensionnels).....	14
Figure II.3 : Les types d'éléments tridimensionnels. C : Eléments tétraédriques D : Eléments hexaédriques. E : Eléments prismatique. F : Eléments pyramida.....	14
Figure II.4 : types d'éléments préférés pour le maillage.....	14
Figure III.1 : Mode de prélèvement d'échantillon pour les tests mécaniques .....	16
Figure III.2 : Le modèle géométrique soudée proposé.....	17
Figure III.3 : le maillage du modèle géométrique.....	18
Figure III.4 : Illustration géométrique des surfaces conditionnées par les conditions aux limites selon la structure imposée dans cette approche.....	19
Figure III.5.a Distribution de champs de contraintes dans l'éprouvette sous les chargements appliqués (vue latérale).....	20
Figure III.5.b Distribution de champs de contraintes dans l'éprouvette sous les chargements appliqués (vue de dessus).....	20
Figure III.5.c : Distribution des champs de déplacement sur l'éprouvette sous chargements appliquée.....	21
Figure III.5.d : Exemple de fissure au long du cordon de soudure.....	21
Figure III.5.e : Evolution des contraintes résiduelles en fonction du déplacement (S11, S Max Principal, S22, S33).....	22
Figure III.5f Evolution des contraintes résiduelles en fonction du déplacement S Max Principal, (modèle2) dans la direction du cordon de soudure de l'extérieur vers l'intérieure.....	23
Figure III.5.g: Evolution du champ de déformation (E11, S Max Principal) dans la direction de pénétration au cœur du cordon de soudure.....	24
Figure III.5.h : Evolution du champs de contrainte S1 en fonction de déplacement U1.....	25

Figure III.5.i : Evolution du champs de contrainte S2 en fonction de déplacement U2.....	26
Figure III.5.j : Evolution du champs de contrainte S3 en fonction de déplacement U3.....	27
Figure III.6 : chemin des nœuds choisis.....	23

## Sommaire

Introduction.....	1
-------------------	---

### Chapitre I : Comportement mécanique des matériaux

I.1. Rappels et définitions.....	4
I.1.1 Les contraintes.....	4
I.1.2 Le tenseur de contrainte.....	6
I.2. Les critères de plasticité.....	6
I.2.1. Critère de Von Mises.....	7
I.2.2. Critère de Tresca .....	8
I.3 Déformations et contraintes induites par le soudage.....	9
I.3.1 Contraintes résiduelles dans les assemblages soudés.....	9
I.3.2 Influence des contraintes résiduelles sur le comportement mécanique d'un ensemble soudé.....	10
I.3.2.1 Résistance statique de l'ensemble.....	10
I.3.2.2 Risques dus aux contraintes résiduelles.....	10

### Chapitre II : Logiciel et simulation numérique

II.1.Présentation du logiciel ABAQUS.....	11
II.2.Préparation d'un modèle physique par ABAQUS.....	13

### Chapitre III : Présentation du modèle proposé, résultats numériques et discussions

III.1. Introduction .....	16
III.2 Le modèle utilisé.....	16
III.3 Maillage de l'éprouvette.....	18
III.4 Les conditions aux limites et le chargement appliqué.....	19
III.5 Résultats de la simulation numérique de la structure soudée.....	20
III.5.1 Distribution de champs de contrainte.....	20
III.5.2 Courbes Contrainte-Déplacement .....	24
Conclusion.....	33

### **Objectif :**

L'objectif de ce travail est d'analyser par simulation numérique le comportement thermomécanique d'une partie d'un tube soudée en spirale en acier à haut limite d'élasticité de grade X70. En tenant en compte du chargement du au soudage et de la pression appliquée lors du service (transport d'un fluide)

Dans le but d'apercevoir le champ de contrainte résiduelles autour et à l'intérieur du joint soudée, et son évolution en fonction de température et de déplacement.

Mots clés : soudage, gradient de contraintes résiduelles, élément finies, température, déplacement, acier faiblement allié.

## Introduction Générale

Durant la Seconde Guerre Mondiale et avec le développement des constructions mécano-soudées de grandes dimensions, des accidents spectaculaires se sont produits, un exemple convaincant est la rupture à quai de nombreux navires de la liberté, en l'occurrence « Liberty Ship ». Pour des raisons de coûts et de délais, le procédé de rivetage des tôles dans ces constructions avait été remplacé, par le soudage. Ce dernier s'est avéré très utile dans la conception de tels navires, et par conséquent, a ouvert la voie à une recherche accrue dans le domaine de la fissuration. Un des laboratoires de recherches navales leader appelait « *Naval Research Laboratory* » a détecté les causes de ruptures fragiles observées. Les travaux de Pellini sur la mise au point d'essais spécifiques et ceux d'Irwin ont conduit aux notions de température de transition ductile-fragile des aciers puis aux développements des concepts de la mécanique linéaire élastique de la rupture.

Dans ce contexte, l'assemblage par soudage occupe une place importante dans l'univers de la construction des bateaux, trains, avions, fusées, automobiles, ponts, tuyaux, réservoirs ...etc. Les procédés de soudage opèrent dans leur majorité par la mise locale des pièces à souder à température de soudage (température de fusion dans la plupart du temps) au niveau de leur joint, cette mise à température s'effectue soit progressivement, soit globalement dans l'espace et dans le temps, au moyen d'une source de chaleur pouvant être associée, pour certains d'entre eux, à un dispositif de pression mécanique s'exerçant pendant le processus de formation de la liaison. L'existence même d'une zone fondue est à l'origine de modifications radicales de l'état interne de l'assemblage. D'une part la solidification de cette zone produit une microstructure particulière, distincte de l'état initial, d'autre part le retrait dimensionnel de soudage induit des contraintes et des déformations résiduelles. Ces déformations sont concentrées autour du cordon de soudure mais elles induisent en pratique des déplacements à l'échelle de la pièce qui modifient ses caractéristiques dimensionnelles.

Par ailleurs, et depuis une quarantaine d'années, le calcul des structures par éléments finis a connu un essor formidable. Les techniques de discrétisations et les algorithmes de calculs de plus en plus performants, alliés à une informatique doublant ses capacités tous les trois ans, permettent de simuler des phénomènes complexes que les progrès technologiques n'ont cessé de mettre en exergue. La modélisation de ces phénomènes permet de limiter les essais expérimentaux. En effet, la concurrence des industriels impose une réduction drastique des essais, ceux-ci mobilisant à la fois

des fonds, du personnel mais aussi du temps. Devant la complexité des mécanismes mis en jeu, on ne peut toutefois pas s'affranchir complètement des essais, car ils permettent d'une part de recalibrer les modèles, et d'autre part de mieux comprendre les phénomènes physiques et ainsi vérifier la validité des hypothèses de la modélisation. Ceci est d'autant plus nécessaire que l'on utilise de nouveaux matériaux et de nouveaux procédés d'assemblage.

La mesure non destructive des contraintes résiduelles est délicate et la simulation numérique du processus de soudage est alors un moyen très attendu dans ce domaine. Elle peut également permettre d'analyser facilement les effets des paramètres de soudage sur les caractéristiques mécaniques du joint soudé et de son influence sur la structure. Les apports de la modélisation numérique du soudage se situent au niveau :

- De la détermination de la microstructure du matériau dans les différentes zones caractéristiques du procédé de soudage,
- De l'évaluation de la tenue mécanique des assemblages soudés (prévoir les contraintes résiduelles et le comportement local d'un assemblage),
- Des études de faisabilité d'un procédé visant à identifier d'éventuels défauts d'alignement des structures ou à optimiser la séquence de soudage.

L'objectif de ce travail est la caractérisation thermomécanique du procédé de soudage des pipelines. Avec la simulation numérique, on détermine l'état résiduel d'une tubulure en acier à haute limite d'élasticité.

Dans notre étude aucune transformation de phases métallurgiques à l'état solide lors du soudage n'est prise en considération. Cependant, même en l'absence des modifications métallurgiques à l'état solide dans la zone affectée thermiquement, la simulation numérique par éléments finis d'une opération de soudage fait intervenir de nombreux phénomènes physiques complexes et nécessite une connaissance fine de nombreux paramètres.

Cette approche numérique est constituée de trois chapitres. Une synthèse bibliographique qui a étayé plusieurs caractéristiques dont une prise en compte indispensable au concept de la mécanique des matériaux, en particulier les critères de plasticité. Les causes des contraintes

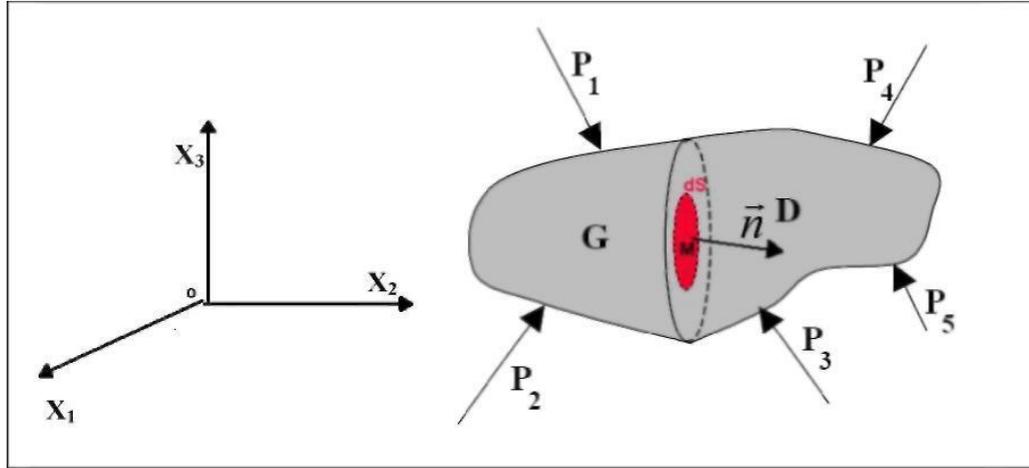
résiduelles dues aux opérations de soudage sont également détaillées dans ce premier chapitre. Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation numérique du comportement thermo mécanique sur une partie prélevée d'un tube soudé en acier à haute limite élastique. Le modèle utilisé, le maillage, et le logiciel sélectionné pour le calcul numérique sont ainsi donnés dans ce deuxième chapitre. Nous avons déterminé numériquement par la méthode des éléments finis les états, le niveau et la distribution des contraintes et des distorsions résiduelles présentes dans la tubulure. Dans le troisième chapitre, sont exposés tous les résultats obtenus le long de cette étude. En fin nous terminons ce travail par une conclusion générale.

## I.1 Rappels et définitions

### I.1.1 Les contraintes

#### - Définitions

Considérons un solide soumis à des forces extérieures



**Figure I.1 :** Solide soumis à des forces extérieures.

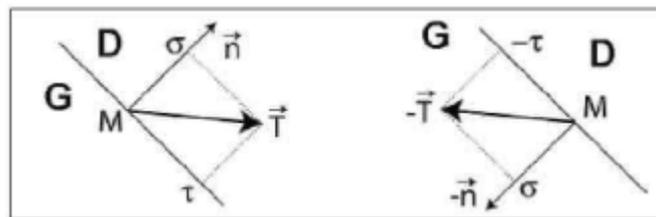
Soit  $M$  un point du solide ( $S$ ),  $(dS)$  la surface élémentaire contenant  $M$ . Appelons  $G$  et  $D$  les parties du solide situées de part et d'autre de  $(dS)$ . Soit  $\vec{n}$  le vecteur normal extérieur de la facette de la partie  $G$ .

$M$  Étant en équilibre, il faut remplacer l'action de la partie  $D$  sur  $G$ . Soit  $(dF)$  l'action élémentaire de  $D$  sur  $M$ .

On appelle vecteur de contraintes  $T$  :

$$T = \frac{dF}{dS} \quad (I.1)$$

Cette grandeur a les dimensions d'une pression. On peut projeter  $T$  sur net sur la facette



**Figure I.2 :** Vecteur contrainte, contrainte normale et cisaillement

On peut tirer la relation qui relie la contrainte normale par le vecteur de contrainte :

$$\sigma = T.n \quad (I.2)$$

La projection de  $T$  sur le plan de la facette est la contrainte tangentielle, parfois notée  $\tau$ , est appelée cisaillement. On remarque que la contrainte normale exercée sur  $D$  est  $\sigma(M, -n)$  :

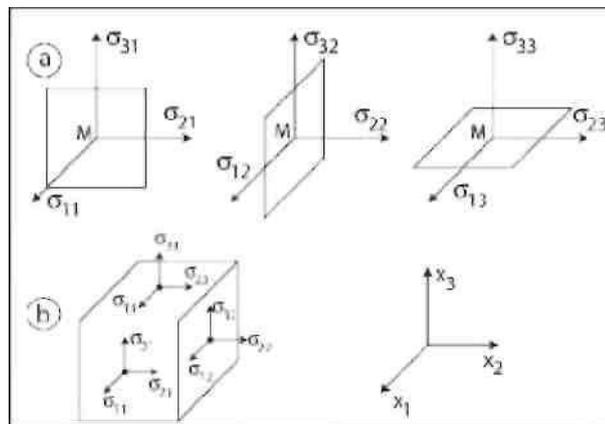
$$\sigma(M, -n) = -T.(-n) = T.n = \sigma(M, n) \quad (I.3)$$

La contrainte normale créée par l'action de  $G$  sur  $D$  est donc la même que celle créée par l'action de  $D$  sur  $G$ .

- $G > 0$  on parle de contrainte de traction ou tension,
- $G < 0$  on parle de contrainte de compression

Le vecteur de contrainte ne définit pas l'état de contrainte au point  $M$  puisqu'il dépend de la facette choisie.

Choisissons, au point  $M$ , les trois facettes ayant pour normales extérieures  $X_1, X_2, X_3$  pour chacune d'elles, le vecteur contrainte peut être décomposé en trois composantes.



**Figure V-3** : Composantes de la contrainte sur les trois facettes 1, 2, 3 au point  $M$  (souvent représenté comme dans la figure b). Exemple : La facette 1 est soumise au vecteur contrainte  $T_1(\sigma_{11}, \sigma_{21}, \sigma_{31})$ . Le premier indice repère la composante, le second définit la normale à la facette.

### I.1.2 Le tenseur de contrainte

On définit le tenseur de contrainte par le tableau des neuf composantes que l'on peut représenter par une matrice carré  $\sigma_{ij}$  dont les vecteurs des colonnes sont  $T_1, T_2, T_3$  :

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (\text{I.4})$$

La connaissance de cette matrice permet de déterminer le vecteur contraint  $T$  pour toute facette passant par  $M$ .

Les composantes  $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$  sont perpendiculaires aux facettes considérées. Ces composantes sont appelées contraintes de tension ou de compression suivant leurs signes.

Les composantes  $\sigma_{13}, \sigma_{31}, \sigma_{21}, \sigma_{12}, \sigma_{32}, \sigma_{23}$  sont des contraintes de cisaillement.

Le tenseur de contraintes est symétrique, on aura donc :

$$\sigma_{13} = \sigma_{31}, \sigma_{21} = \sigma_{12}, \sigma_{32} = \sigma_{23} \quad (\text{I.5})$$

### I.2 Les critères de plasticité

La limite d'élasticité est la contrainte au-dessus de laquelle apparaissent les premières déformations plastiques irréversibles. C'est ce qu'on appelle le critère de plasticité. Pour les métaux isotropes les deux critères isotropes les plus utilisés sont ceux de Von Mises et de Tresca.

L'expression de ces deux critères dépend a priori de toutes les composantes du tenseur des contraintes ainsi que de la variable d'érouissage. Dans le cas d'érouissage isotrope la variable d'érouissage se réduit à une variable scalaire, c'est le  $\sigma_s$  [1]. Donc la fonction  $f$  de charge qui dépend du tenseur de contrainte, et de l'état de contrainte s'annule [1].

$$(f)(\sigma_y, \sigma_s) = 0 \quad (\text{I.6})$$

En raison de l'isotropie et de l'invariance par rapport aux repères, seuls les trois invariants du tenseur des contraintes peuvent entrer en compte. De plus, en raison de l'incompressibilité plastique par rapport aux contraintes hydrostatiques, seules les invariants du déviateur des contraintes  $\mathbf{G}$  peuvent intervenir, Nous obtenons l'expression générale des critères isotropes [2].

$$f(S_2, S_3, \sigma_s) = 0 \text{ Et } \left\{ \begin{array}{l} S_2 = \frac{1}{2} Tr(\sigma'^2) \\ S_3 = \frac{1}{3} Tr(\sigma'^3) \end{array} \right\} \quad (I.7)$$

$\sigma'$  : Tenseur déviateur des contraintes

Si on utilise les invariants homogènes associés.

$$\left\{ \begin{array}{l} J_2 = (3S_2)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{3}{2} \sigma_y \sigma_y \right)^{\frac{1}{2}} \\ J_3 = \left( \frac{27}{2} S_3 \right)^{\frac{1}{3}} = \left( \frac{9}{2} \sigma_{ij} \sigma_{jk} \sigma_{ki} \right)^{\frac{1}{3}} \end{array} \right\} \quad (I.8)$$

### I.2.1 Critère de Von Mises

Le critère de Von Mises a été établi en considérant que le seuil de plasticité est lié à l'énergie élastique de cisaillement,  $W_e$ , qui est une fonction du produit tensoriel contracté sur deux indices du déviateur du tenseur des contraintes [1]

$$W_e = \int_0^{\varepsilon} \sigma : d\varepsilon^e \quad (I.9)$$

$$W_e = \frac{1}{4\mu} \sigma : \sigma \quad (I.10)$$

Lorsque la limite d'élasticité  $\sigma_s$  est atteinte au cours d'un essai de traction pur, l'état de contrainte est simple  $\sigma = \sigma_s$

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{I.11})$$

L'expression de Von Mises est donnée dans ce cas par la relation suivantes : [2]

$$W_e = \frac{1}{6\mu} \sigma_s^2 \quad (\text{I.12})$$

$$f = \sigma_{eq} - \sigma_s = J_2 - \sigma_s = 0 \quad (\text{I.13})$$

Ainsi, l'état de contrainte tel que  $\sigma_{eq} = \sigma_s$  est équivalent au sens de Von Mises à l'état unidimensionnel défini par  $\sigma_s$ , l'expression développée du critère de Von Mises dans l'espace des contraintes à 6 dimensions est :

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{2} (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2) \quad (\text{I.14})$$

### I.2.2 Critère de Tresca

Le critère de Tresca relie le seuil de plasticité  $\sigma'_s$  à la contrainte de Tresca, qui est la contrainte tangentielle maximale. En égalant sa valeur pour l'état unidimensionnel équivalent correspondant au seuil  $\sigma'_s$ , on obtient l'expression du critère [1] :

$$f = \text{Sup}(|\sigma_i - \sigma_j|) - \sigma_j = 0 \quad (\text{I.15})$$

Ou encore :

$$\frac{1}{2} \text{Sup}(|\sigma_i - \sigma_j|) = \frac{\sigma_s}{2} \quad (\text{I.16})$$

### I.3 Déformations et contraintes induites par le soudage

#### I.3.1 Contraintes résiduelles dans les assemblages soudés

Les déformations de retrait n'étant pratiquement jamais libre, il existe dans tous les assemblages soudés des contraintes résiduelles soit de traction ou de compression, dont l'importance peut avoir des conséquences néfastes pour la sécurité d'un assemblage soudé. On peut distinguer quatre types de contraintes :

- contraintes résiduelles directes

Elles sont dues aux déformations de retrait empêchées dans le joint soudé, ces contraintes n'affectent que la zone au voisinage immédiat du cordon de soudure. Il est impossible de les éviter ; elles résultent de la répartition non uniforme du flux thermique dans l'assemblage soudé.

- contraintes résiduelles indirectes, ou de bridage

Elles sont dues au bridage de l'ensemble soudé, qui s'oppose aux dilatations et aux retraits. Ces contraintes affectent l'étendue de chaque élément de l'ensemble de manière uniforme.

- contraintes parasites (extérieures à l'opération de soudage)

Ce sont celles qui s'exercent sur le joint soudé pendant l'opération de soudage par exemple, masse de l'ensemble en porte à faux pendant le soudage.

On peut les réduire considérablement, sinon les annuler, en adoptant des dispositions en conséquence.

- contraintes résiduelles directes longitudinales dans les assemblages bout à bout

Dans le cas des soudures bout à bout on peut considérer que la valeur des contraintes longitudinales ( $\sigma_L$ ) atteint la limite d'élasticité du matériau dans une zone égale environ à 6 fois celle du métal fondu.

Pendant le soudage, le métal de base qui se trouve dans la zone du cordon de soudure est porté à haute température, et sa dilatation est entravée par les zones où le métal est pratiquement froid les fibres longitudinales sont refoulées à chaud et exercent, après refroidissement, une traction sur le métal de base.

Après soudage le joint se trouve tendu dans le sens longitudinal, ainsi dans le cordon de soudure et dans ses abords [5].

### **I.3.2 Influence des contraintes résiduelles sur le comportement mécanique d'un ensemble soudé.**

#### **I.3.2.1 Résistance statique de l'ensemble**

Les contraintes résiduelles s'auto-équilibrent et l'on admet généralement qu'elles n'ont pas d'influences défavorable sur le comportement statique de l'ensemble, à condition qu'une quantité suffisante de métal déposé assure une résistance convenable (sans fissure, ni amorce de rupture). Il existera toujours à coté de contraintes résiduelles de même signe que la charge de service, d'autres contraintes résiduelles de signes opposé et qui agiront dans le sens favorable. Lorsque de légères déformations plastiques se produisent sous l'effet des charges de service dans les zones les plus sollicitées, les contraintes résiduelles tendent à disparaître.

#### **I.3.2.2 Risques dus aux contraintes résiduelles**

- Structures soumises au flambement (ou flambage) :

Les contraintes résiduelles, et surtout les déformations entraînent une diminution des charges admissibles sur les éléments soumis au flambement, les coefficients de flambement sont plus importants pour les ensembles soudés que pour les laminés ; les contraintes résiduelles peuvent donc réduire la valeur de la charge admissible, et se combiner avec les contraintes de service et, le cas échéant, avec des contraintes parasites dues à l'exécution ou au montage de l'ensemble.

- Structures soumises au risque de rupture fragile :

Lorsqu'un élément d'une structure est soumis à des contraintes multidirectionnelles de traction, il ne peut se déformer plastiquement. Dans ce cas, si la rupture se produit elle a lieu brutalement par décohesion (rupture fragile). Parmi les facteurs qui rendent un acier sensible au risque de rupture fragile on note entre autre le niveau des contraintes de traction auxquelles est soumis le métal. Les contraintes résiduelles du soudage, qui sont très souvent multidirectionnelles viennent s'additionner aux contraintes de service qui peuvent conduire à une rupture fragile. Il est donc très important, chaque fois que cela est possible de diminuer au maximum l'importance des contraintes résiduelles, Surtout si le joint soudé doit travailler à la fatigue.

L'étude que l'on va faire concerne le comportement thermomécanique de la soudure spiral d'une bobine. Nous avons réalisé sur une partie de tube soudée en spiral contient le cordon de soudure, une approche par une simulation numérique de la distribution des contraintes en fonction du déplacement à l'aide du logiciel ABAQUS qui permet de visualiser les champs de contrainte et leur répartition dans le joint de soudure.

## II.1 Présentation du logiciel ABAQUS

ABAQUS est un code de calcul par la méthode des éléments finis, créée en 1978.

Il est utilisé pour résoudre des problèmes :

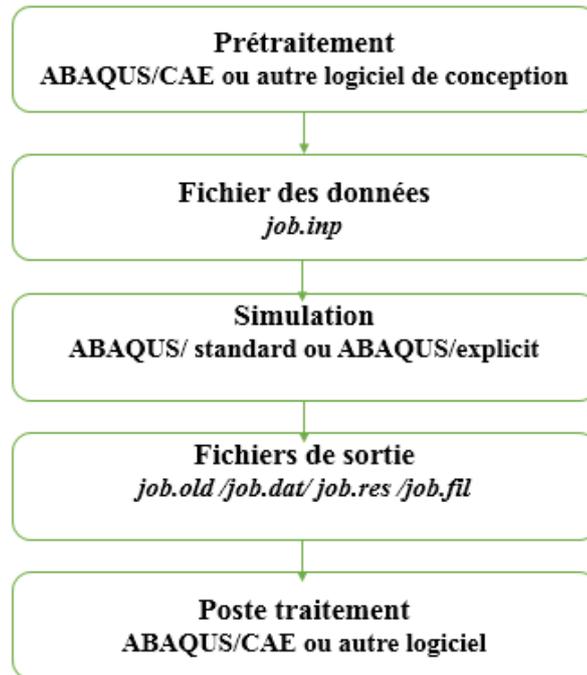
- de structure : calcul du champ de déformation et de contrainte,
- de transfert thermique,
- de diffusion de masse,
- de mécanique des sols,
- d'acoustique,
- de piézoélectricité.

Ce logiciel permet de coupler plusieurs modèles de comportements mécaniques pour donner un comportement proche de la réalité. Il est capable de simuler le comportement de la plupart des matériaux comme les métaux, le béton, les composites, les polymères,...etc.

Dans notre problème nous prenons un modèle élastique comme comportement mécanique. On considère que les matériaux utilisés sont isotropes, et on fait intervenir l'effet thermique et on néglige la viscosité des matériaux.

Le fonctionnement de ce logiciel est basé sur trois étapes principales [3] :

- prétraitement,
- simulation,
- post traitement.



**Figure II-1** Les étapes essentielles de fonctionnement d'ABAQUS.

### 1-Le prétraitement

Dans cette étape on définit le modèle du problème physique de la pièce ou de la structure à étudier ; le modèle est créé graphiquement en utilisant ABAQUS/CAE [3].

### 2-La simulation

Cette étape consiste à résoudre les équations du modèle en utilisant soit la méthode standard soit la méthode explicite. C'est l'étape la plus longue car le temps de résolution dépend du degré de complexité du problème, de la puissance de l'ordinateur et de la précision exigée. Les résultats de la résolution sont stockés dans un fichier *job.old* pour être prêts à l'étape suivante [3].

### 3-Le post traitement

C'est la phase de calcul des efforts, des déformations, et des contraintes dans les éléments. Elle contient également toute la partie de post traitement graphique (illustration, analyse, coupes, visualisation des champs de déformation et répartition du champ de contrainte dans la structure étudiée, ...etc.).

## II.2- Préparation d'un modèle physique par ABAQUS

Comme tout logiciel, pour créer un modèle il faut d'abord avoir le maximum possible d'information, sur ABAQUS, on doit définir les informations suivantes :

- la discrétisation de la géométrie
- les propriétés physiques du matériau
- les conditions aux limites
- le type de résolution ou d'analyse
- la sortie des inconnus souhaitée [3]

### 1- Création géométrique

Le logiciel de CAO nous a permis de définir les dimensions de la pièce, et ses différentes zones structurales. Cette première étape de préparation du modèle est incluse dans *ABAQUS/CAE*. Elle est nommée « part ».

Si la structure est compliquée et nécessite une conception des plusieurs parties différentes, une commande sur *ABAQUS/CAE*. Nommée « assembly » nous donne la main d'assembler plusieurs « part ».

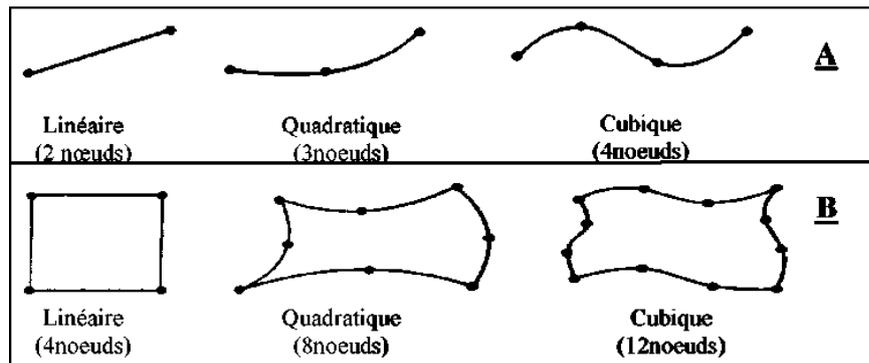
### 2- Propriétés physiques du matériau

Quand le modèle géométrique de la pièce est créé on lui donne un modèle mathématique qui décrit le comportement mécanique ou thermique des matériaux utilisés. *ABAQUS/CAE* dispose de plusieurs modèles mathématiques dans sa bibliothèque. Ce logiciel donne la possibilité d'insérer d'autres modèles. Pour chacun d'eux pris dans cette étape on doit définir ses coefficients qui varient selon le matériau utilisé. Cette étape est appelée « property ».

### 3- Maillage du modèle

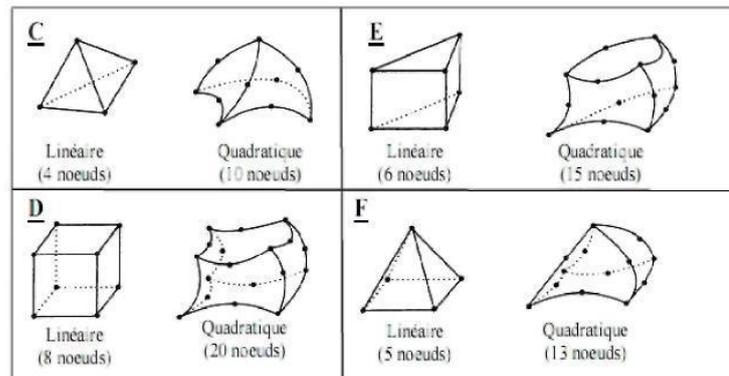
La phase la plus délicate d'un processus de calcul par élément finis est le maillage de la pièce. Un bon maillage est nécessaire pour faire un bon calcul. Cela consiste en le choix des éléments de discrétisation et leur dimension. On distingue trois familles d'éléments :

- les éléments unidimensionnels,
- les éléments bidimensionnels,
- les éléments tridimensionnels.



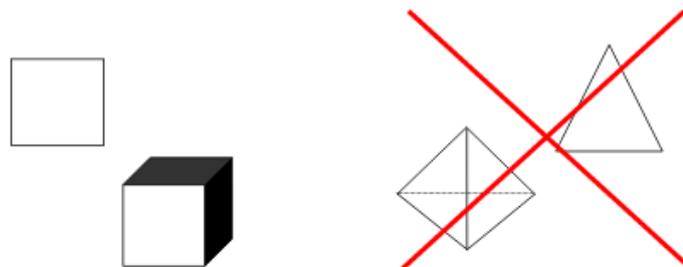
**Figure II-2 :** Les types d'éléments unidimensionnels et Bidimensionnels. A : Elément à une dimension. B : Eléments Quadrangulaires (type bidimensionnels).

Chaque élément se caractérise par le nombre des nœuds et leur degré de liberté.



**Figure II-3 :** Les types d'éléments tridimensionnels. C : Eléments tétraédriques D : Eléments hexaédriques. E : Eléments prismatique. F : Eléments pyramida

Le type de maillage préféré systématiquement favorise les éléments quadrilatères ou hexaédriques sur les éléments triangulaires ou tétraédriques (faible taux de convergence et problèmes de verrouillage pour les matériaux incompressibles).



**Figure II-4 :** types d'éléments préférés pour le maillage

#### 4- Les conditions aux limites

On résout les équations élémentaires de la structure pour trouver les déformations ou les déplacements par l'utilisation des conditions aux limites et les chargements appliqués sur la pièce. Ces chargements peuvent être la pression, les moments, les forces ponctuelles...etc.

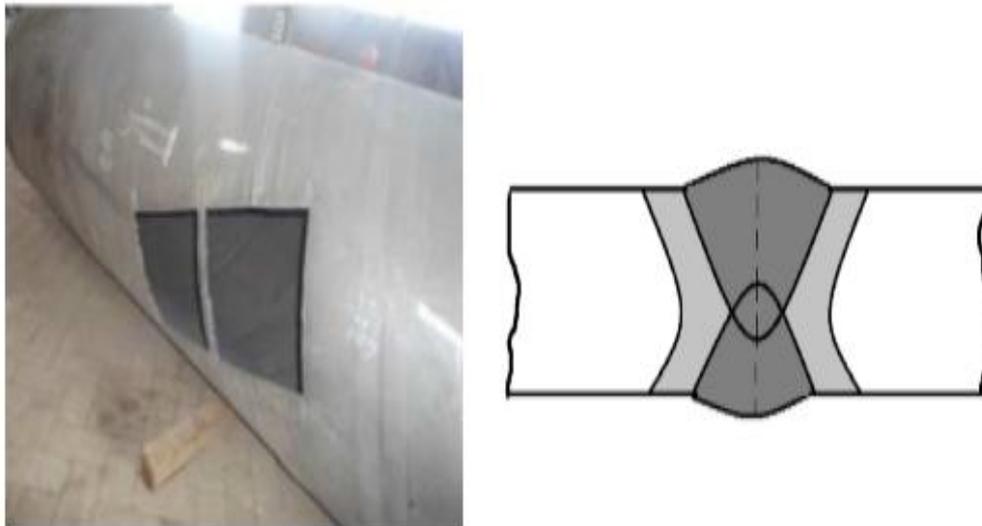
Dans un problème mécanique, il y'a deux familles de conditions limites, une exprimée en termes de déplacement imposé et l'autre en terme de contrainte imposée. Etant donné la forme de la loi de comportement la condition limite en contrainte imposée équivaut à un gradient de déplacement imposé. Ces deux conditions sont respectivement identifiées comme conditions de *Dirichlet* (déplacement imposé) et *Neuman* (contrainte imposée). Elles sont parfaitement similaires.

### III.1 introduction :

La fabrication des tubes soudés en matériaux métalliques consiste à un formage d'une bobine généralement en acier à haute limite d'élasticité sous forme d'une tube en spirale. Le soudage appliqué pour l'assemblage est de type automatique nommé sous le nom « soudage à électrode enrobée (Submerged Arc Welding).

On choisit le modèle selon la géométrie de l'échantillon a étudié, et qui a subit différents tests mécaniques et par approche numérique on va étudier le comportement thermomécanique de matériaux sous l'effet de soudage

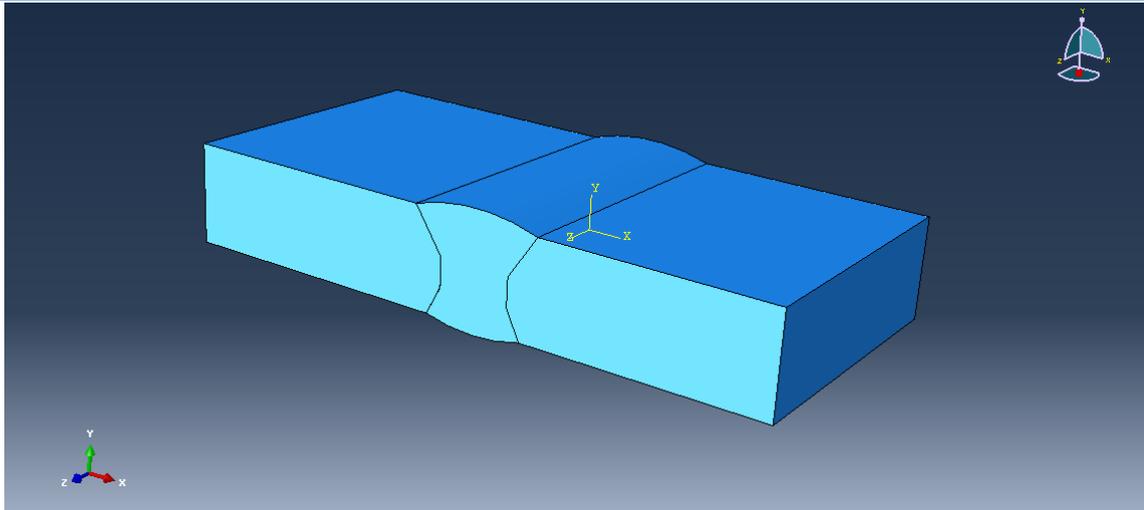
La figure si dessous justifie le choix du modèle :



**Figure III.1** "Mode de prélèvement d'échantillon pour les tests mécaniques

### III.2 Le modèle utilisé

La première étape est de créer un modèle, la géométrie est considérée comme deux plaques épaisses chanfreinées en V opposées soumises à un soudage en double passe intérieure et extérieure.



**Figure III.2** Le modèle géométrique soudée proposé

Selon l'aspect mécanique de cette étude, on s'intéressera uniquement aux propriétés élastiques linéaires d'un corps solide homogène et isotrope, les propriétés mécaniques élastiques de notre acier en l'occurrence le module d'Young  $E$  (GPa) a été insérées en fonction de la température, le coefficient de dilatation  $\alpha$  a été inséré en fonction de la température à l'aide de logiciel MPDB (Materials Properties Data Base).

On notera que ces deux grandeurs sont suffisantes pour caractériser un matériau sous sollicitations mécaniques élastiques linéaires mais n'ont de signification évidente qu'en sollicitation de traction uni axiale ou :

$$\sigma_{zz} = E \varepsilon_{zz} \text{ Et } \varepsilon_{yy} = -\nu \cdot \varepsilon_{zz}$$

Admettant que le tube comporte une soudure pénétrante en profondeur. En service, celle-ci est soumise à des pressions admissibles selon le développement suivant :

$$\sigma_x = \sigma_L = P.r / e$$

$$\sigma_y = \sigma_T = P.r / 2e$$

$\sigma_L$  : Contrainte latéral

$P$  : pression appliqué

$\sigma_T$  : Contrainte tangentiel

$r$  : rayon de tube,

$\sigma_e$  : Limite d'élasticité.

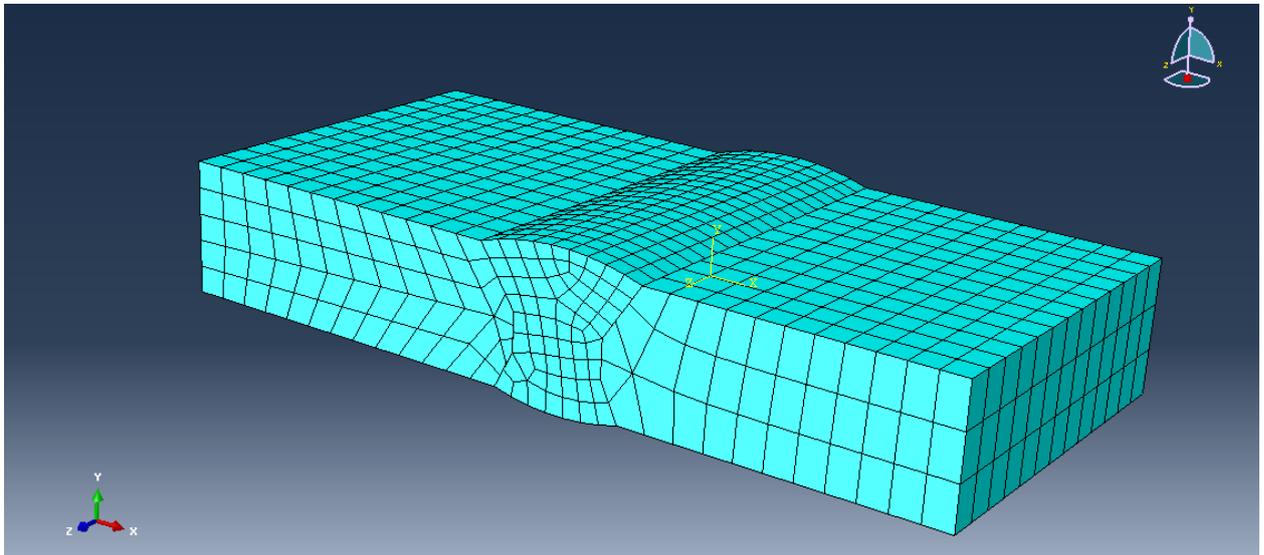
$e$  : épaisseur de tube.

Les sollicitations mécaniques de sécurité en service exigent cette condition  $\sigma_T \ll \sigma_e$

Dans le cadre de notre approche, on suppose que le métal de base et le métal de soudure ont les mêmes propriétés mécaniques.

### III.3 Maillage de l'éprouvette

Nous commençons par la discrétisation du modèle géométrique en petits éléments volumiques. En prenant les éléments tétraédriques avec des fonctions d'interpolation quadratiques. L'ordre de grandeur des tailles raisonnables d'un élément de volume représentatif pour les métaux et les alliages en général est donné entre  $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}$  et  $0.1 \times 0.1 \times 0.1 \text{ mm}$  pour donner un sens physique aux contraintes et aux déformations.



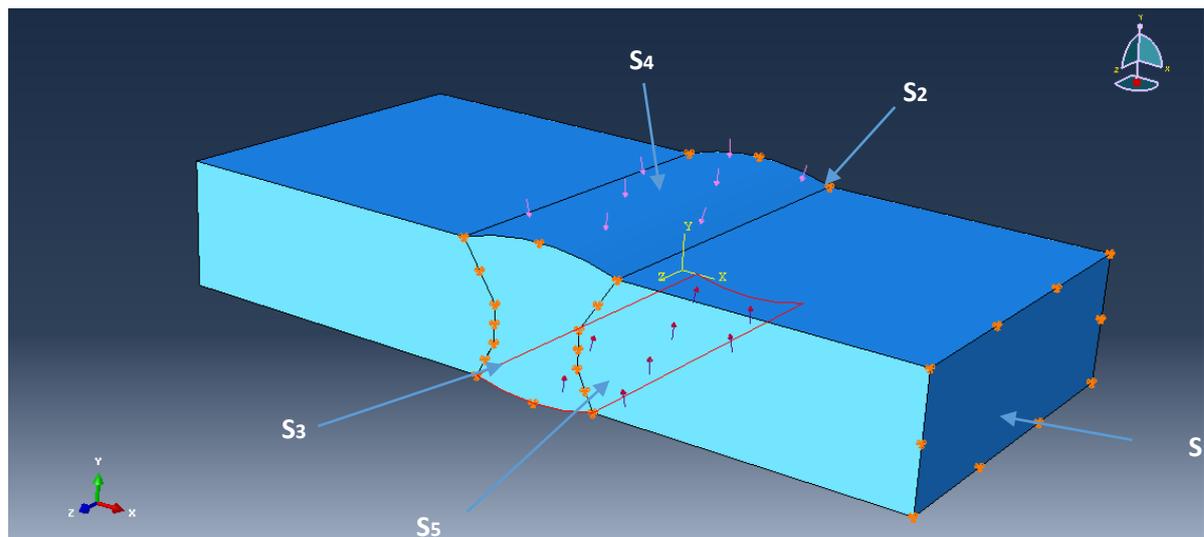
**Figure III.3** : le maillage du modèle géométrique

### III.4 Les conditions aux limites et le chargement appliqué

On applique les conditions aux limites suivantes :

1/ Encastrement des surfaces S1, S2, S3 de l'éprouvette, cette condition consiste à annuler les déplacements dans les trois directions et à annuler la rotation dans les trois sens, c'est -à-dire que les nœuds situés dans cette surface sont fixes ;

2/ Chargement d'une tension sur les surfaces S4, S5 : cette condition consiste à donner une tension sur les nœuds situés dans cette surface, en raison des tensions induites lors de l'opération de soudage, on fait varier les contraintes en fonction du déplacement. Dans notre cas, nous avons imposé comme tension (ou pression)  $\sigma = -10MPa$ . Sa direction vectorielle est perpendiculaire à la surface



**Figure III.4** : Illustration géométrique des surfaces conditionnées par les conditions aux limites selon la structure imposée dans cette approche

### III.5 Résultats de la simulation numérique de la structure soudée :

#### III.5.1 Distribution de champs de contraintes

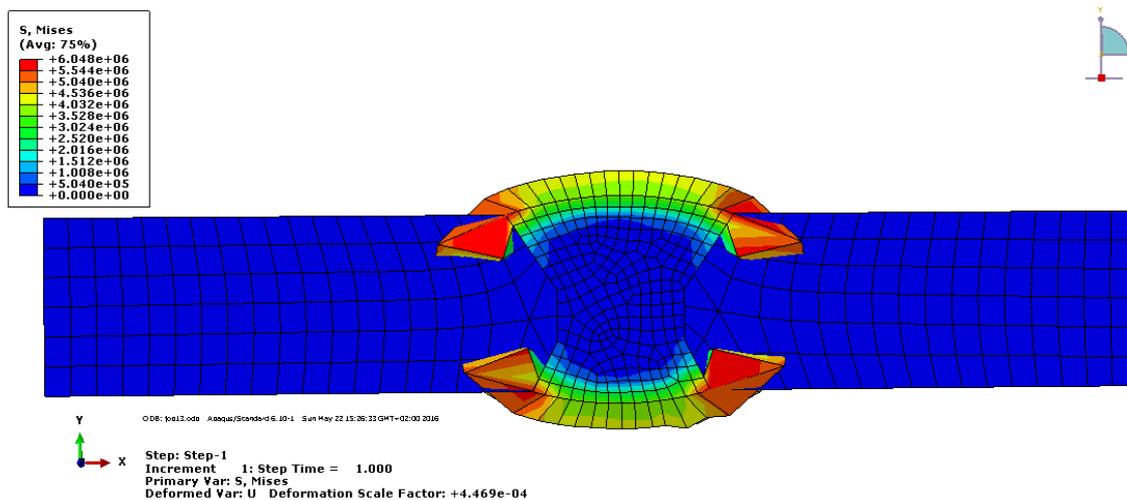


Figure III.5.a : Distribution de champs de contraintes dans l'éprouvette sous les chargements appliqués (vue latérale)

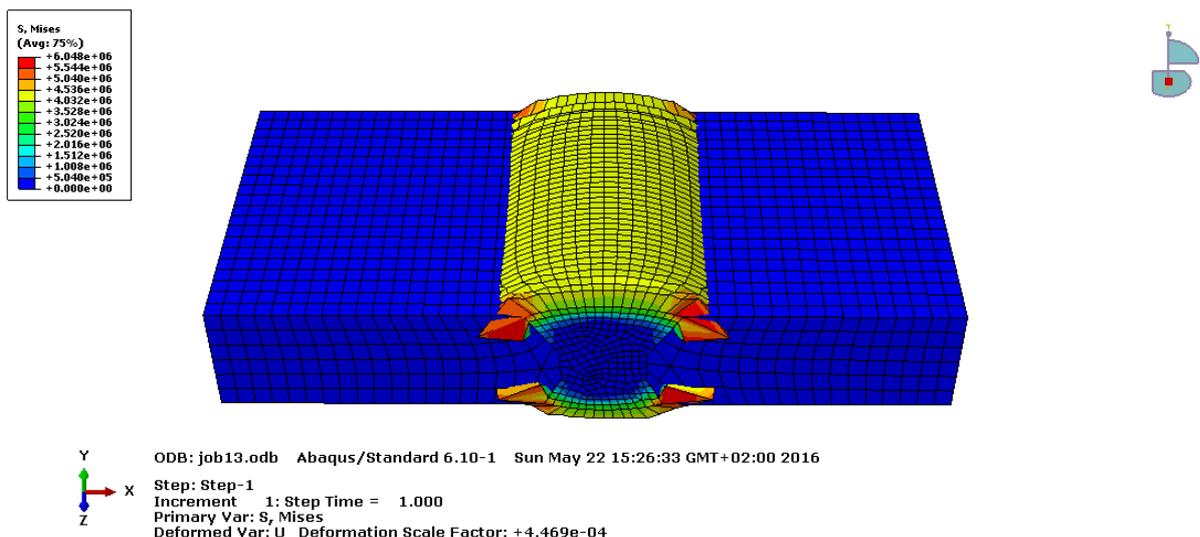
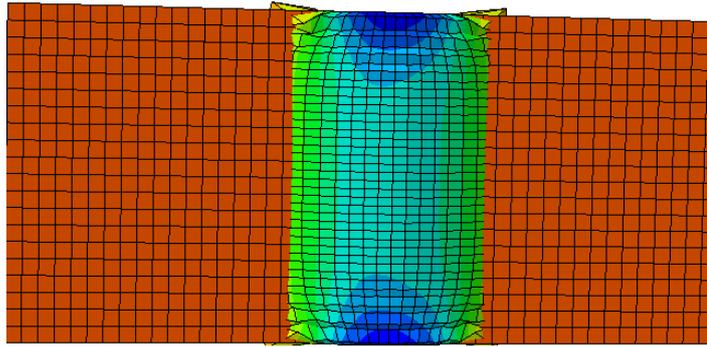
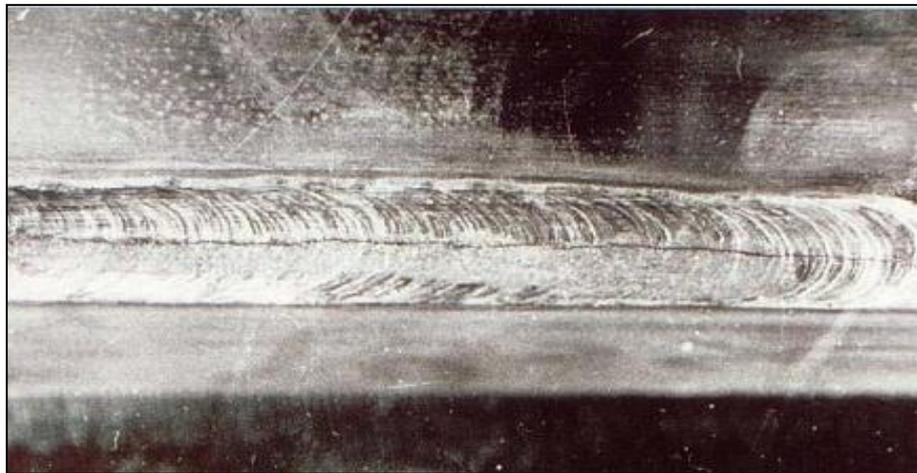


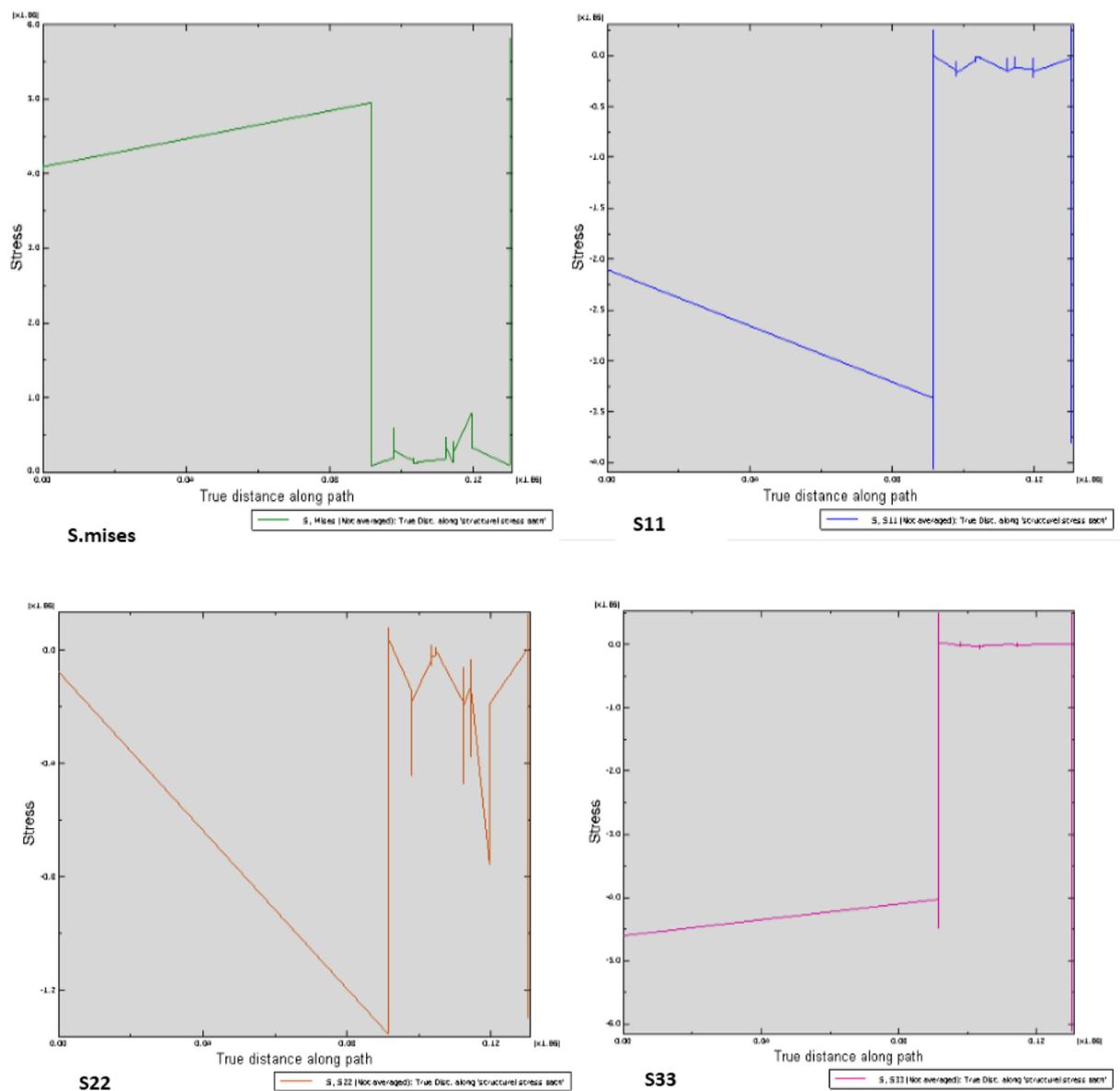
Figure III.5.b : Distribution de champs de contraintes dans l'éprouvette sous les chargements appliqués (vue de dessus)



**Figure III.5.c :** Distribution des champs de déplacement sur l'éprouvette sous chargements appliquée



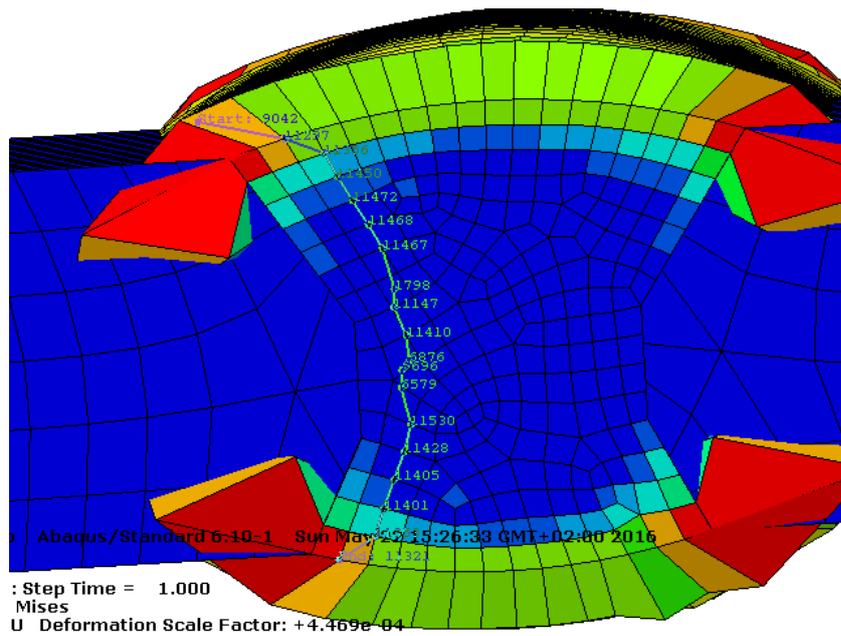
**Figure III.5.d :** exemple de fissure au long du cordon de soudure



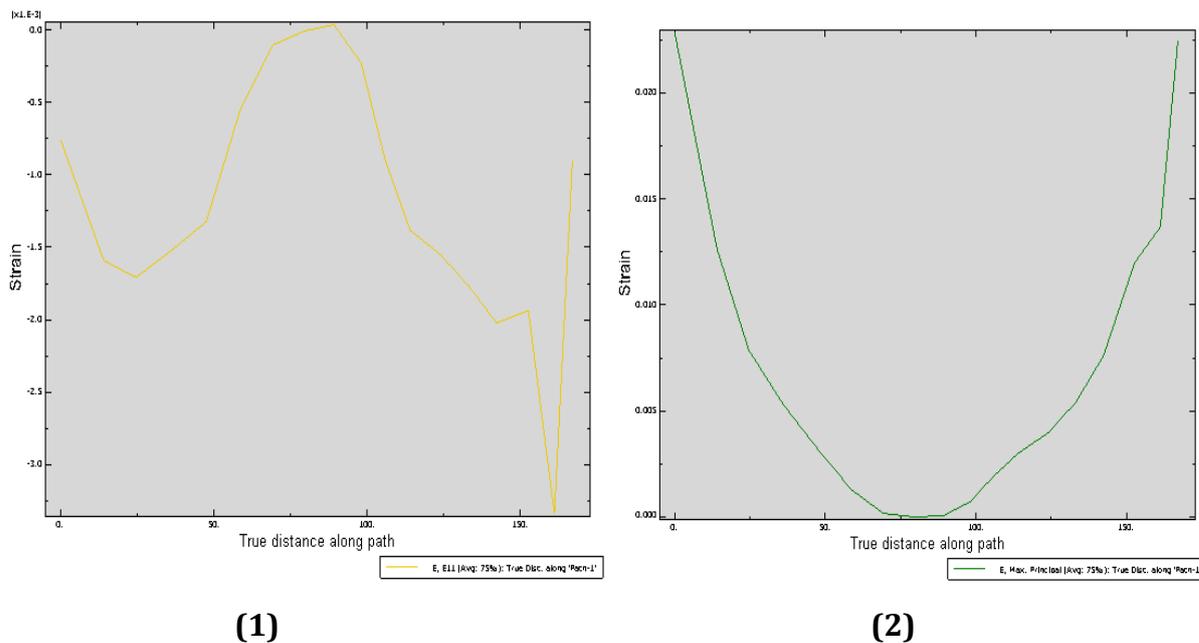
**Figure III.5.e** Evolution des contraintes résiduelles en fonction du déplacement (S11, S Max Principal, S22, S33)



**Figure III.5.f :** Evolution des contraintes résiduelles en fonction du déplacement S Max Principal, (modèle 2) dans la direction du cordon de soudure de l'extérieur vers l'intérieure



**Figure III.6 :** chemin des nœuds choisis

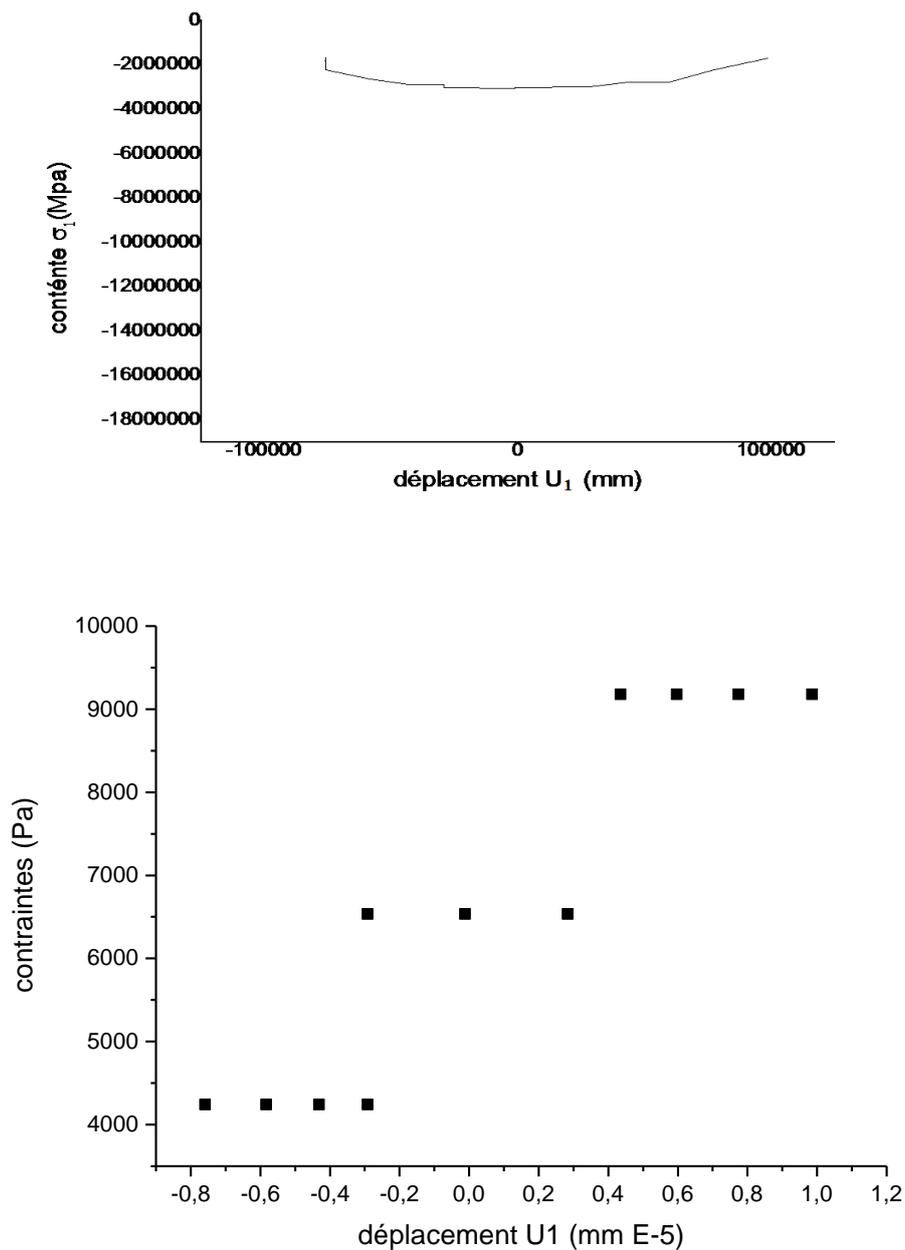


**Figure III.5.g :** Evolution du champ de déformation (E11, S Max Principal) dans la direction de pénétration au cœur du cordon de soudure

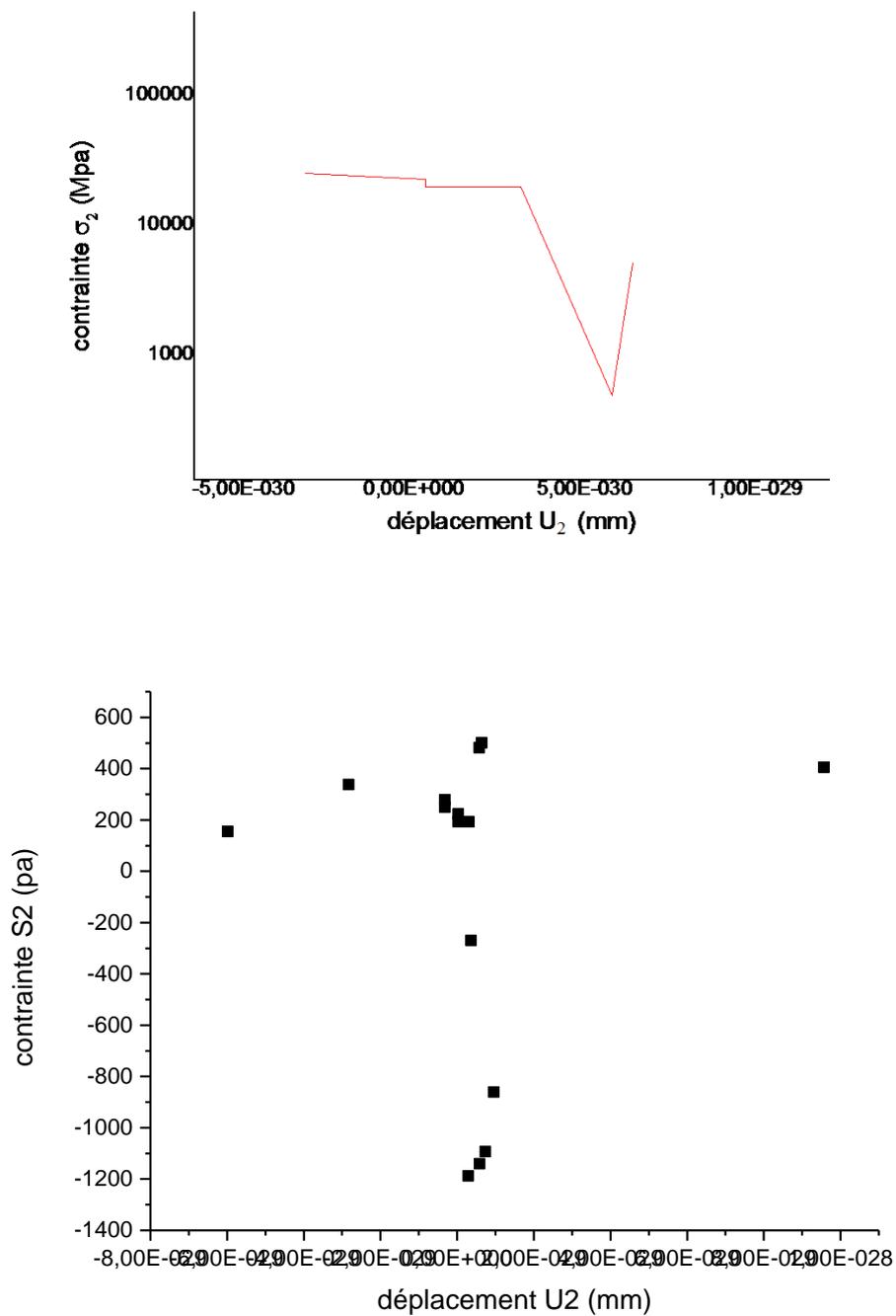
### III.5.2 Courbes Contrainte-Déplacement :

Afin de tracer les courbes contrainte-déplacement, on doit procéder en premier lieu à une sélection ou un choix des noeuds à insérer dans le graphe correspondant. Selon l'objectif de notre étude, trois directions ont été prise en considération :

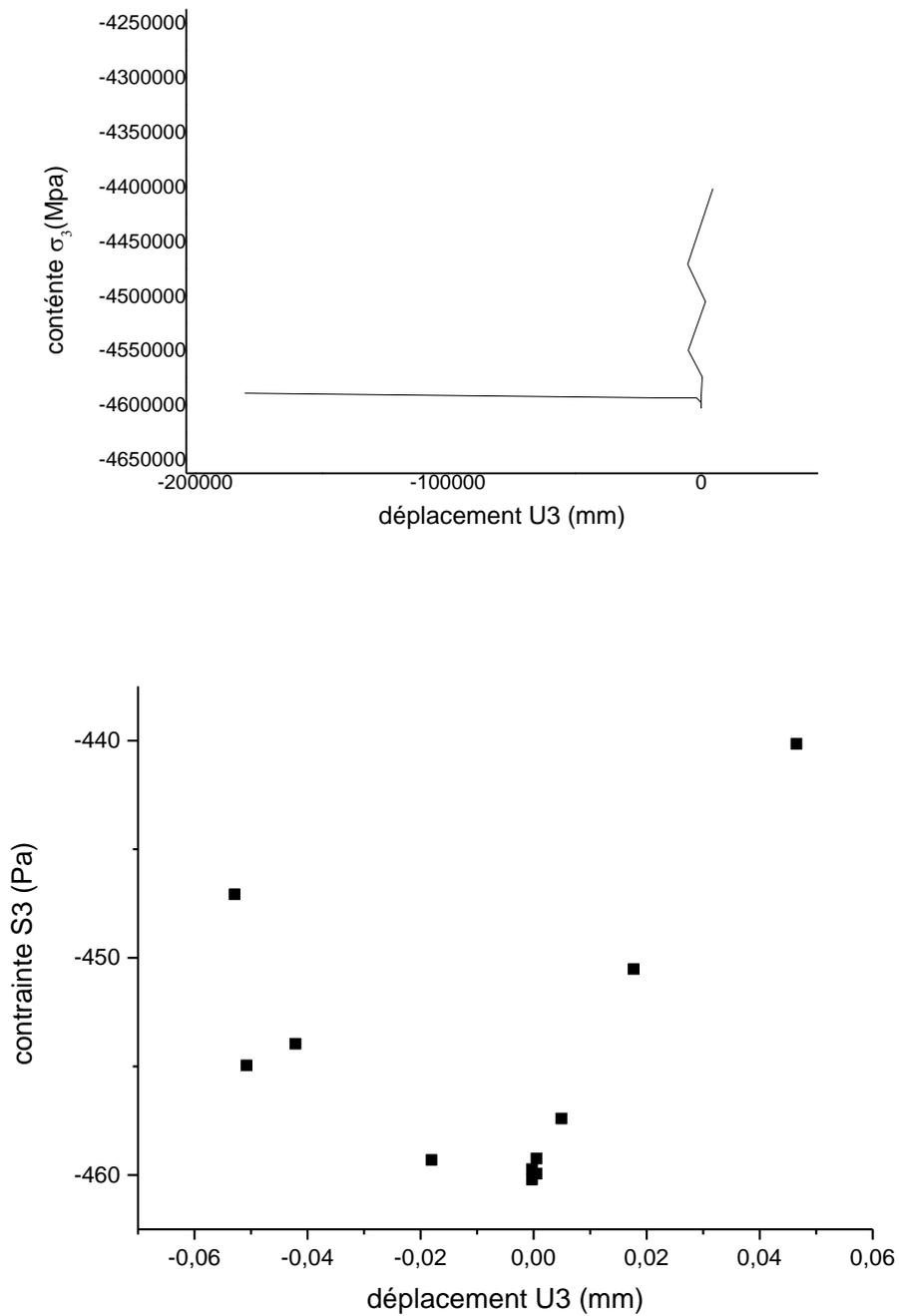
- Celle qui est perpendiculaire à la direction de soudage  $U_1$  ;
- L'autre qui correspond à la direction de soudage à mi-portée  $U_2$  ;
- Une troisieme dirrection suivant le coeur du cordon de soudure  $U_3$ .



**Figure III.5.h** : Evolution du champs de contrainte S1 en fonction de déplacement U1



**Figure III.5.i** Evolution du champs de contrainte S2 en fonction de déplacement U2



**Figure III.5.j** : Evolution du champs de contrainte S3 en fonction de déplacement U3

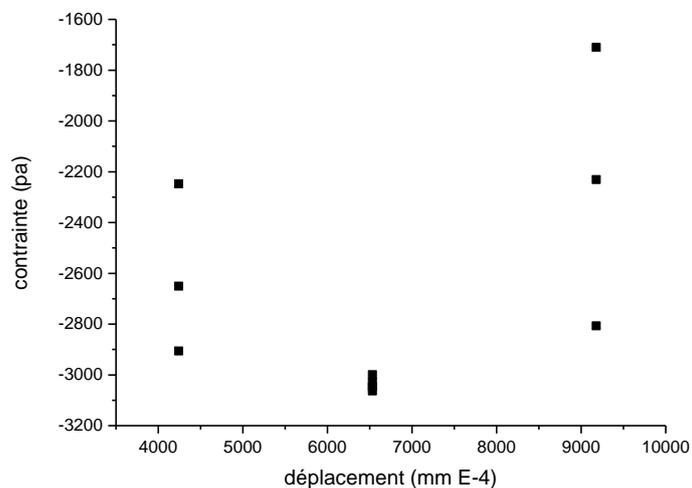
**Commentaire :**

Les contraintes résiduelles induites par les soudures ou par la pression de fluide lors de service sont dues à un champ de chargement mécanique élevé supposé uniforme. Les contraintes internes d'origine mécanique se régénèrent pendant la soudure et elles sont extrêmement sensibles aux variations de déplacement. Leurs répartitions dépendent de la tension ou la charge appliquée totale et des modèles de leurs distributions dans le cordon de soudure.

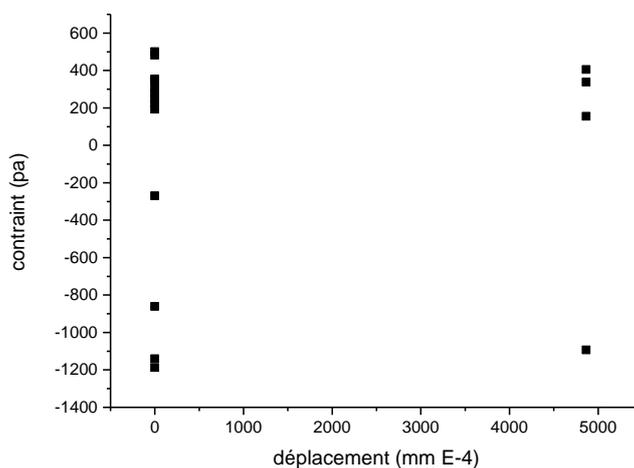
Les Figures ci-dessus présentent une différence de comportement concernant l'évolution de la contrainte en fonction du déplacement dans les trois directions principales et en termes de contrainte principale de Von mises, nous avons constaté que les courbes les plus significatives correspondent aux **Figures III.5.f** et **g**. La lecture directe à travers ces courbes nous conduit à mieux interpréter l'évolution des contraintes résiduelles induites par les conditions de simulation imposées, et qui doivent être proches de celles en service ; En effet, sur la **Figure III.5.g** l'évolution de la contrainte déplacement maximal de Von mises en fonction, on enregistre une évolution progressive et croissante des contraintes résiduelles jusqu'à un maximum puis on assiste à une diminution induite par l'isotropie imposée dans la rubrique des propriétés mécaniques et la symétrie maillage, le seuil maximale apparaît à une distance aux alentours de 75 % du parcours choisis et au voisinage de la soudure par rapport à l'évolution des champs de contraintes et de déformation correspondants.

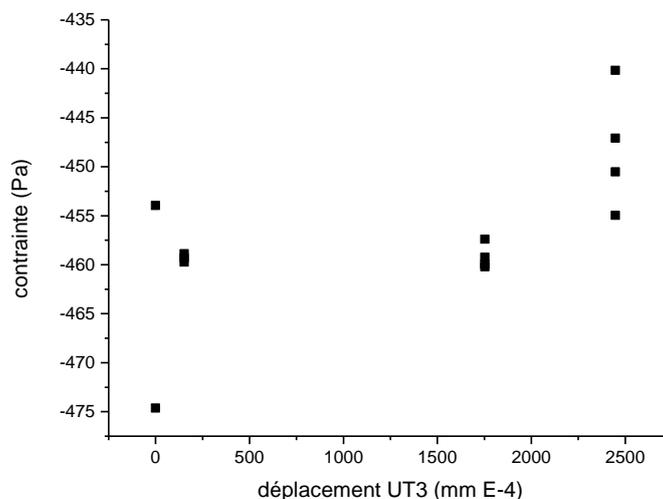
Les autres Figues montrent la comparaison entre ces champs de contraintes et de déformation mesurés dans différentes directions, tenant compte de l'état moins déformé (Métal de base ou état « vierge »). Bien qu'il y'a une bonne concordance entre ces deux grandeurs et que le calcul par éléments finis varie généralement entre 50% et 77% les résultats numériques ne montrent aucune variation. Les nœuds choisis selon le trajet de la ZAT et calculées numériquement semblent moins influencés par les contraintes résiduelles et par les déformations subies par la plaque ou l'éprouvette du modèle.

**Evolution des contraintes en fonction de déplacement influencé par la température de service :**



**Evolution des contraintes en fonction de déplacement thermique  $U_{t1}$  influencé par la température**



**Evolution des contraintes en fonction de déplacement  $U_{12}$  influencé par la température****Evolution des contraintes en fonction de déplacement  $U_{13}$  influencé par la température**

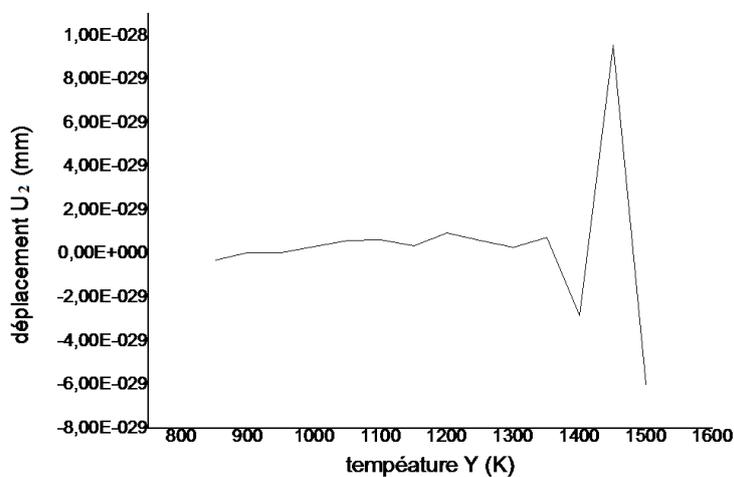
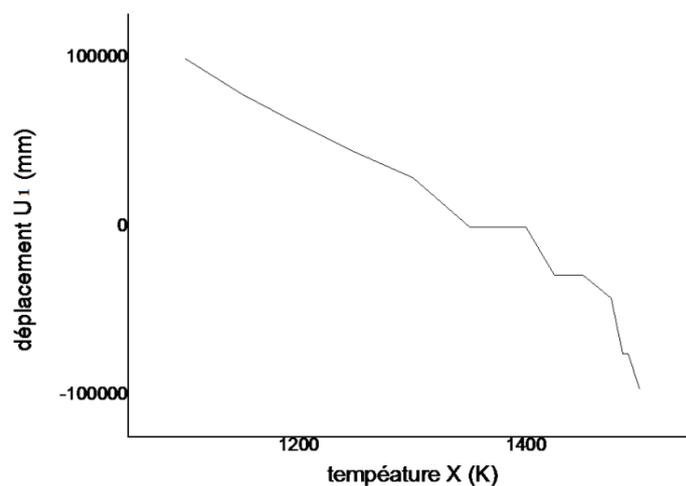
L'intégration de la température comme variable induit une légère évolution des valeurs de déformation, ce qui est logique vu que les paramètres d'entrée contenant le coefficient de dilatation en fonction de la température.

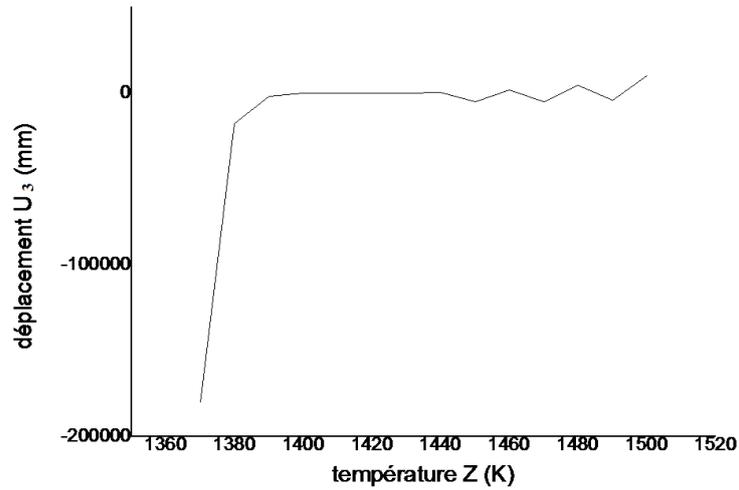
Cette approche-là est introduite puis qu'on considère que lors de la circulation d'un fluide dans le tube il va engendrer un champ de contrainte de compression, et aussi un apport de chauffage des parois dû à l'interaction fluides solide (parois interne de tube). On considère que la partie la plus sensible à cette force extérieure est celle proche de la soudure elle-même, dont la simulation de l'évolution de la contrainte résiduelle en fonction de déplacement suivant les trois directions considérées, donne des renseignements sur la source d'endommagement, sa direction de propagation probable dans ces parties.

- Sur l'axe perpendiculaire au cordon de soudure, les contraintes résiduelles sont de compression due à la contraction de la matière avec une évolution plutôt négligeable.

- Sur l'axe de pénétration au cœur des déplacements importants apparaissent à l'extrémité du cordon de soudure
- Sur l'axe de cordon de soudure une relaxation des contraintes est remarquable en fonction de l'augmentation de la température

**Courbe de déplacement en fonction de gradient de température :**

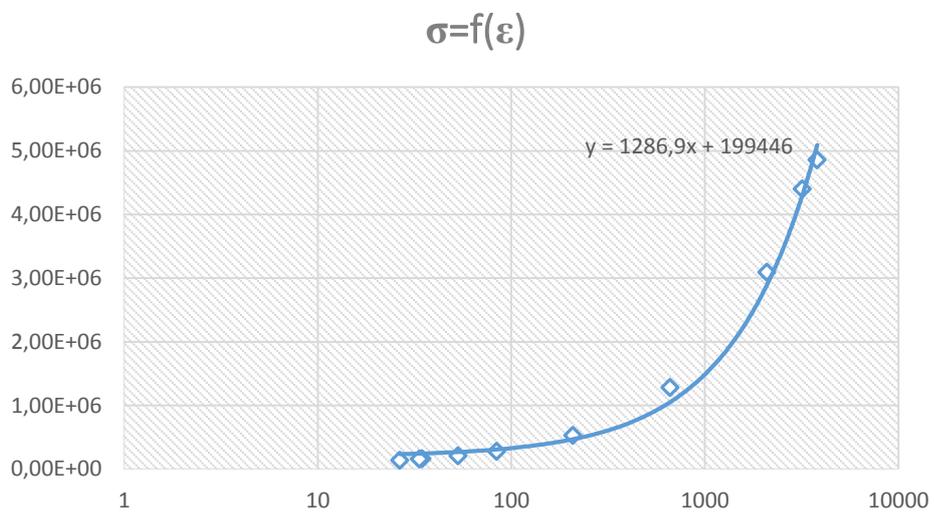




**Commentaire :**

L'apport thermique en général provoque des déplacements sur la matière, il est acceptable jusqu'à un seuil sur une tolérance admissible sans aller vers la fissuration et puis la rupture

**Evolution de la déformation : (en échelle logarithmique)**



## Conclusion générale :

La préoccupation majeure des industriels dans le monde est le comportement en service des joints soudés. Il est courant que les opérations d'assemblage comme le soudage conduisent à des déformations intenses au niveau de la zone affectée thermiquement (ZAT), conséquences de l'apparition des contraintes résiduelles. La microstructure du matériau se trouve ainsi considérablement modifiée par les sollicitations mécaniques et thermiques appliquées localement aux constructions en service. La zone fondue est constituée de gradients métallurgiques et mécaniques très localisés au niveau du joint soudé qui conduisent généralement à l'apparition de ces champs de déformations et à la présence de contraintes résiduelles. C'est la raison pour laquelle, les modifications et les conséquences induites par ce procédé se révèlent donc essentielles pour prédire le comportement en service des structures.

Bien que cette distribution des contraintes résiduelles joue un rôle important dans la tenue en service des structures en causant des ruptures par fatigue, des fissurations ou encore de la corrosion sous contraintes. Les distorsions associées peuvent causer des problèmes de tolérances dimensionnelles des structures. Ainsi, une meilleure compréhension et maîtrise des contraintes résiduelles permettrait d'éviter l'utilisation de facteurs de sécurité plus élevés et, par conséquent de mieux optimiser la taille et la durée de vie des structures.

Dans le cadre de notre étude numérique, on a présenté une première tentative de l'étude de l'influence des sollicitations thermomécaniques sur une la répartition des champs de contraintes résiduelles au niveau d'une éprouvette soudée en acier HLE de nuance X70. Les résultats obtenus révèlent une différence de comportement aux niveaux des nœuds choisis relativement aux conditions imposées par le modèle proposé. Il a été observé que l'apport thermomécanique a révélé une nette augmentation de la contrainte par rapport au seuil de l'élasticité de ces aciers, relativement à l'apport mécanique. Il aurait été souhaitable d'enrichir le travail en insérant différents modèles de maillage et de choisir différents trajets de nœuds, afin de comparer les différents champs contraintes déformations obtenus dans les trois dimensions.

Il est indispensable de signaler aussi qu'en raison des conditions réelles dans lesquels ce travail a été réalisé (Le master selon la politique de l'ENSM n'est pas considéré comme étant un travail d'initiation à la recherche mais juste un complément de formation, ainsi que les logiciels

utilisés dans le cadre de notre étude, en l'occurrence *ABAQUS* et *MPDB* ne sont pas originaux, ils manquent d'options et sont insuffisants pour résoudre des problèmes aussi complexes comme le nôtre), il était difficile d'apporter une correction et / ou optimisation des profils de contraintes résiduelles distribuées en profondeur au voisinage d'un cordon de soudure, sous sollicitations thermomécaniques.

## **Bibliographie**

- [1] LEMAITRE Jean, CHABOCHE Jean Louis, mécanique des matériaux solides. 1988.
- [2] Mohamed Lamine FARES. Principes physiques du comportement mécanique des matériaux. Publication de l'université BADJI MOKHETAR- Annaba.
- [3] Le Manuel d'Abaqus/CAE
- [4] Beniguel J.-F., Modélisation du comportement mécanique des assemblages de structures soudées, Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [5] ITIM Youcef. Modélisation du comportement thermomécanique d'une pipeline : influence des jonctions. Publication de l'université de MENTOURI – Constantine

## Annexe : exposé de la démarche

Pour résoudre un problème par la méthode des éléments finis, on procède donc par étapes successives :

1-On se pose un problème physique sous la forme d'une équation différentielle ou aux dérivés partiels à satisfaire en tout point d'un domaine  $\Omega$  avec des conditions aux limites sur bord  $d\Omega$ .

2-on construit une formulation intégrale du système différentiel à résoudre et de ses conditions aux limites : c'est la formulation vibrationnelle du problème

3- on divise  $\Omega$  en sous domaines : c'est le maillage. Les sous domaines sont appelés mailles.

4-On choisit la famille de champs locaux, c'est-à-dire à la fois position des nœuds dans les sous domaines et les polynômes (ou autres fonctions) qui définissent le champ local en fonction des valeurs aux nœuds (et éventuellement des dérivées). La maille complétée par ses informations est appelée élément.

5-On ramène le problème à un problème discret : c'est la discrétisation. En effet toute solution approchée est complètement déterminée par les valeurs aux nœuds des éléments il suffit donc de trouver les valeurs à attribuer aux nœuds pour décrire une solution approchée. Le problème fondamental de la méthode des éléments finis peut se résumer en deux questions :

a. comment choisir le problème discret dont la solution est « proche » de la solution exacte ?

b. Quelle signification donner au mot « proche »

6-On résout le problème discret ; c'est la résolution

7-On peut alors construire la solution approchée à partir des valeurs trouvées -aux nœuds et en déduire d'autres grandeurs ; c'est le post-traitement

8- On visualise et on exploite la solution pour juger de sa qualité numérique et juger si elle satisfait les critères du cahier des charges ; c'est l'exploitation des résultats elle satisfait les critères du cahier des charges ; c'est l'exportation des résultats.

9-Les étapes 1,2,3,4,et 5 sont souvent rassemblées le nom de prétraitement

Le travail de ces différentes étapes est assisté par les logiciels. Il reste que pour maîtriser leur utilisation, il est indispensable de comprendre les fondements de la méthode, notamment les phases 3 et 4 ne serait-ce que pour comprendre et choisir intelligemment parmi les options qu'ils proposent.