

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MÉMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

**En** : Mécanique

**Spécialité** : Assemblages soudés et matériaux

**Par** : M<sup>elle</sup>. Khadidja DINEDANE

**Sujet**

***Effet du chargement uniaxial sur le comportement d'un joint soudé  
type à clin : Simulation et analyse***

Soutenu publiquement, le 18 / 06 / 2025, devant le jury composé de :

M. CHEIKH Abdelmadjid	PR	Université de Tlemcen	Président
M. GUENIFED Farouk Abdelhalim	MAA	Université de Tlemcen	Examineur
M. BENSALD Ismail	MCA	Université de Tlemcen	Encadreur
M. HADJOUI Abdelhamid	PR	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2024 /2025

## ***Remercîments***

*Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention, directe ou indirecte, de nombreuses personnes que je souhaite remercier à travers ces quelques lignes.*

*Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mes parents et à l'ensemble de ma famille pour leur soutien moral constant, leur patience et leur encouragement tout au long de ce parcours.*

*Je remercie également du fond du cœur Monsieur **Ismail BENS Aid** et Monsieur **Abdelhamid HADJOU I**, qui m'ont offert un encadrement précieux. Leurs conseils avisés, leur disponibilité, leur bienveillance et la confiance qu'ils m'ont accordée ont été déterminants dans la réalisation de ce travail.*

*Mes sincères remerciements s'adressent également à président du jury **Abdelmadjid CHEIKH**, et à **Abdelhalim Farouk GUENIFED**, examinateur, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire.*

*Je n'oublie pas non plus l'ensemble de mes enseignants du Département de Mécanique, qui m'ont accompagné tout au long de ma formation.*

*Enfin, je remercie toutes les personnes, connues ou anonymes, qui ont contribué, de près ou de loin, à l'accomplissement de ce travail.*

## *Dédicaces*

*À ceux qui sont les fondations de ma vie, les battements discrets derrière  
chacun de mes efforts.*

*À mon père, pilier silencieux de ma force, dont la sagesse éclaire mes choix et  
dont le respect m'enseigne l'essentiel.*

*À ma mère, lumière inépuisable, dont l'amour infini a été mon refuge, et dont  
les sacrifices silencieux ont bâti mes rêves.*

*À ma sœur au cœur tendre, et à mon frère, allié de toujours vos mots, vos  
gestes, vos sourires m'ont portée plus loin que vous ne l'imaginez.  
Que le destin vous comble de bonheur autant que vous m'en avez offert.*

*À Imad, Othman, Mehdi et Israe mes neveux, petites étincelles de joie dans le  
tumulte du quotidien.*

*Merci pour chaque instant partagé, chaque encouragement discret, chaque  
silence plein de sens.*

*À tous ceux qui ont laissé une trace dans cette aventure : cette page vous  
appartient autant qu'à moi.*

*Résumé*

Le soudage par points est un procédé largement utilisé dans diverses industries pour assembler des tôles métalliques de manière rapide et fiable. Ce procédé repose sur l'application simultanée de pression mécanique et de courant électrique pour créer des points de soudure solides sans ajouter de matériau. L'étude présentée dans ce travail explore les différents aspects du soudage par points, en se concentrant sur la modélisation numérique des comportements mécaniques des joints soudés. Elle examine également les méthodes d'essais destructifs qui permettent de caractériser les propriétés mécaniques des matériaux utilisés et d'évaluer la qualité des soudures. Les simulations numériques ont permis d'analyser l'influence de plusieurs paramètres sur la performance des assemblages soudés, en tenant compte de facteurs tels que l'épaisseur des pièces, le diamètre des points de soudure, et la charge appliquée. Cette étude contribue à une meilleure compréhension des mécanismes qui gouvernent le soudage par points et propose des éléments pour optimiser ce procédé dans le cadre de diverses applications industrielles.

**Mots clés**

Soudage par points, simulation numérique, éléments finis, propriétés mécaniques, essais destructifs, résistance mécanique, assemblage métallique, contraintes, matériaux, efficacité industrielle, modélisation, optimisation du procédé.

### ملخص

اللحام النقطي هو عملية تستخدم على نطاق واسع في مختلف الصناعات لتجميع الصفائح المعدنية بسرعة وبشكل موثوق. تعتمد هذه العملية على التطبيق المتزامن للضغط الميكانيكي والتيار الكهربائي لإنشاء نقاط لحام صلبة دون إضافة مواد. تستكشف الدراسة المقدمة في هذا العمل الجوانب المختلفة للحام النقطي، مع التركيز على النمذجة العددية للسلوك الميكانيكي للوصلات الملحومة. كما يدرس طرق الاختبار التدميري لتوصيف الخواص الميكانيكية للمواد المستخدمة وتقييم جودة اللحامات. سمحت عمليات المحاكاة العددية بتحليل تأثير العديد من المعلمات على أداء التجميعات الملحومة، مع الأخذ في الاعتبار عوامل مثل سمك الأجزاء، وقطر نقاط اللحام، والحمل المطبق. تساهم هذه الدراسة في فهم أفضل للآليات التي تحكم اللحام النقطي وتقتراح عناصر لتحسين هذه العملية في التطبيقات الصناعية المختلفة.

### كلمات مفتاحيه

اللحام النقطي، المحاكاة العددية، العناصر المحدودة، الخواص الميكانيكية، الاختبارات التدميرية، القوة، تجميع المعادن، الضغوط، المواد، الكفاءة الصناعية، النمذجة، تحسين العمليات

*Abstract*

Spot welding is a process widely used in various industries to assemble sheet metal quickly and reliably. This process is based on the simultaneous application of mechanical pressure and electrical current to create solid weld points without adding material. The study presented in this work explores the different aspects of spot welding, focusing on the numerical modeling of the mechanical behavior of welded joints. It also examines destructive testing methods for characterizing the mechanical properties of the materials used and assessing the quality of the welds. The numerical simulations allowed to analyze the influence of several parameters on the performance of welded assemblies, taking into account factors such as the thickness of the parts, the diameter of the weld points, and the applied load. This study contributes to a better understanding of the mechanisms that govern spot welding and proposes elements for optimizing this process in various industrial applications.

**Keywords**

Spot welding, numerical simulation, finite elements, mechanical properties, destructive testing, strength, metal assembly, stresses, materials, industrial efficiency, modelling, process optimization..

***Liste des Abréviations***

**SP** : Soudage par point

**RSW** : résistance spot welding (soudage par points de résistance)

**ZAT** : zone affectée thermiquement

**CRDM** : Centre de recherche et développement mécanique

**AC** : Alternating Current (courant alternatif)

**MFD** : Medium Frequency Direct Current (courant continu à moyenne fréquence)

**ISO** : International Organization for Standardization Organisation internationale de normalisation)

**NFA** : Norme française appliquée

**MB** : Métal de base

**SCZAT** : Zone Subcritique Affectée Thermiquement

**ICZAT** : Zone Intercritique Affectée Thermiquement

**GFZAT** : Zone à Grains Fins Affectée Thermiquement

**GGZAT** : Zone à Gros Grains Affectée Thermiquement

**C.A.S.P.R.** : Coefficient d'Aptitude au Soudage par Résistance

**ZF** : Zone Fondue

**CAE** : Complete Abaqus Environment

**FEA** : Finite Element Analysis (Analyse par éléments finis)

**SI** : Système international d'unités

**US** : United States

**EN** : Norme européenne

**DC**:Deep Drawing Cold rolled (emboutissage profond à froid)

*Liste des symboles*

**W**: Énergie thermique  
**I**: Intensité du courant électrique  
**R**: Résistance électrique  
**t**: Temps  
 **$\rho$** : Résistivité électrique  
**L**: Longueur  
**S**: Section  
**T**: Température  
 **$\alpha$** : Coefficient de température  
**D**: Diamètre  
**e**: Épaisseur  
**F**: Force  
 **$\Delta L$** : Allongement  
 **$\sigma$** : Contrainte  
**e**: Allongement relatif  
**Re**: Limite d'élasticité  
**RP<sub>0,2</sub>**: Limite conventionnelle d'élasticité  
**A(%)**: Allongement  
**Rm**: Résistance à la traction  
**E**: Module d'élasticité  
**Rpe**: Résistance pratique à l'extension  
**lu**: Longueur ultime (longueur de l'éprouvette après rupture)  
**Su**: Section ultime (section de l'éprouvette après rupture)  
**s**: Coefficient de sécurité  
**v**: Coefficient de Poisson  
**M**: Masse  
**h**: Profondeur  
**HB**: Dureté Brinell  
**HV**: Dureté Vickers  
**HRC**: Dureté Rockwell C

*Liste des figures*

Figure I.1:Principaux soudage par résistance .....	21
Figure I.2: Soudage par points .....	22
Figure I.3:Les phases de soudage par point .....	24
Figure I.4 : Mécanisme du soudage par point.....	25
FigureI.5 : Électrode de la soudure par point.....	27
Figure I.6 : Différents forme des électrodes de la soudure par point.....	28
Figure I.7: Mécanisme de formation de point de soudure de soudage par point.....	29
Figure I.8:Schéma d'un point soudé selon une coupe .....	30
FigureI.9: Microstructures générées par l'opération de soudage .....	32
Figure I.10 : Distance entre chaque point .....	33
FigureI.11:Effet du courant de soudage sur le diamètre du noyau soudé.....	35
Figure I.12: Effet du temps de soudage sur le diamètre de noyau .....	35
Figure I.13: Effets de l'effort aux électrodes sur le diamètre du noyau soudé .....	36
FigureI.14 : Soudage par point des tôles revêtues .....	40
Figure II.1:Éprouvette.....	45
Figure II.2:Courbe brute de l'essai de traction .....	46
Figure II.3:Allure de la courbe brute en traction de la nature du matériau.....	47
Figure II.4:Allure courbe conventionnelle de traction.....	48
Figure II.5:Limite conventionnelle d'élasticité $Re_{0,2}$ .....	50
Figure II.6:Principe de l'essai de brinell .....	53
Figure II.7:Principe de l'essai de vickers .....	54
Figure II.8:Principe de l'essai Rockwell par cône.....	55
Figure II.9:Éprouvette de résilience $\mu$ .....	58
Figure II.10:Machine d'essai de résilience.....	59
Figure II.11:Influence de la température sur la résilience .....	60
Figure II.12:Éprouvette toroïdale de fatigue.....	63
Figure II.13:Différents type de sollicitation appliqué en fatigue .....	63
Figure II.14: Caractéristique d'une sollicitation cyclique.....	64
Figure II.15:Schéma idéal d'une courbe de Wöhler.....	65
<b>Figure II.16:</b> Dispersion des résultats des mesures de fatigue.....	65
Figure II.17:Essai de déboutonnage.....	67

## Liste des figures

---

Figure II.18:Essai de cisaillement par traction du point soudé.....	67
Figure II.19:Essai de cisaillement par torsion du point soudé.....	68
Figure II.20 : <b>Micrographie du point soudé</b> .....	68
Figure II.21:Essai de dureté .....	69
Figure III.1:Organigramme de résolution de schéma implicite. ....	73
Figure III.2: Organigramme de résolution de schéma explicite. ....	74
Figure III.3: Différents types d'éléments disponibles dans la bibliothèque d'ABAQUS.....	75
Figure III.4:Structure d'analyse sur ABAQUS.....	76
Figure III.5: Représentation 2D de la géométrie de l'éprouvette étudiée.....	77
Figure III.6 : Représentation du corps rigide indéformable le modèle type à clin .....	78
Figure III.7: Éprouvette en acier déformable.....	78
Figure III.8: Assemblage des éléments, (l'éprouvette étant comme un corps rigide) .....	79
Figure III.9: Interaction entre les 2 éprouvettes.....	80
Figure III.10: Conditions limites et charges appliquées sur l'éprouvette .....	80
Figure III.11: Maillage de la structure du joint soudé par point .....	81
Figure III.12: Maillage raffiné au niveau de point de soudure .....	81
Figure III.13: Évolution de la contrainte équivalente de Von Mises au cours de la simulation	82
<b>Figure III.14:</b> Champ de déplacement global (U magnitude) .....	82
Figure IV.1: Concentration de contrainte dans une éprouvette entaillée sollicitée en traction.	85
Figure IV.2: Évolution de la contrainte équivalente de Von Mises au cours de la simulation.	90
Figure IV.3: Champ de déplacement global (U magnitude).....	91
Figure IV.4: Contrainte de Von Mises pour cuivre-cuivre .....	95
Figure IV.5 : Contrainte de Von Mises pour acier-cuivre .....	95
Figure IV.6 : Contrainte de Von Mises pour C = 2 mm .....	97
Figure IV.7: Contrainte de Von Mises pour C = 6 mm .....	98
Figure IV.8: Contrainte de Von Mises pour D =13 mm.....	100
Figure IV.9: Contrainte de Von Mises pour D = 14 mm.....	100
Figure IV.10: Contrainte de Von Mises pour e = 3 mm.....	102
Figure IV.11: Contrainte de Von Mises pour e = 4 mm.....	102
Figure IV.12: Échantillon avec 2 points soudés en parallèle avec un diamètre de 8 mm .....	104
Figure IV.13: Échantillon avec 1 point soudé D=12 mm (cas de référence).....	104
Figure IV.14: Contraintes de Von Mises pour deux points de soudure parallèles de diamètre 8 mm .....	105
Figure IV.16: Échantillon avec 2 points soudés en série avec un diamètre de 8 mm.....	107
Figure IV.15: Échantillon avec 2 points soudés en parallèle avec un diamètre de 8 mm .....	107

## *Liste des figures*

---

Figure IV.17: Contraintes de Von Mises pour deux points de soudure en série de diamètre 8 mm .....	108
Figure IV.18: Surface (verticale) d'application de la force de traction sur l'assemblage acier-acier.....	110
Figure IV.19: Application de la charge de traction sur la surface verticale de l'éprouvette ...	111
Figure IV.20: Surface (horizontale) d'application de la force de traction sur l'assemblage acier-acier.....	111
Figure IV.21: Application de la charge de traction sur la surface horizontale de l'éprouvette	112
Figure IV.22: Contraintes de Von Mises pour l'application de la charge de traction sur la surface verticale pour $c = 1$ mm.....	112
Figure IV.23: Contraintes de Von Mises pour l'application de la charge de traction sur la surface horizontale pour $c = 1$ mm .....	113

***Liste des tableaux***

Tableau I.1: Parametre de soudage par point.....	28
Tableau I.2: Paramètre recommandé pour le soudage de l'acier doux.....	38
Tableau I.3: Paramètre du soudage par points de l'acier inoxydable.....	42
Tableau III.1: Inconvénients et avantages du module implicite et explicite.....	74
Tableau III.2: Les unités dans ABAQUS. ....	76
Tableau IV.1: Composition chimique de l'acier DC03 .....	87
Tableau IV.2: Composition chimique du cuivre.....	88
Tableau IV.3: Les paramètres utilisés.....	89
Tableau IV.4: Synthèse des résultats numériques (contraintes de Von Mises, magnitude U) .	92
<b>Tableau IV.5:</b> Résultats des contraintes normales simulées dans le cas acier-acier .....	93
Tableau IV.6: Résultats des déplacements horizontaux (U) dans le cas acier-acier.....	94
Tableau IV.7: Valeurs des contraintes de Von Mises traitées par ABAQUS pour acier-acier (cas de référence), cuivre-cuivre, acier-cuivre.....	96
Tableau IV.8: Valeurs des contraintes maximales et minimales par type d'assemblage pour acier-acier (cas de référence), cuivre –cuivre, acier-cuivre .....	96
Tableau IV.9: Valeurs des contraintes de Von Mises traitées par ABAQUS pour C = 2 mm, C = 4 mm (cas de référence), C = 6 mm .....	98
Tableau IV.10: Valeurs des contraintes maximales et minimales pour différentes charges pour C = 2 mm, C = 4 mm (cas de référence), C = 6 mm.....	99
Tableau IV.11: Valeurs des contraintes de Von Mises traitées par ABAQUS pour : Valeurs des contraintes de Von Mises traitées par ABAQUS pour D =12 mm (cas de référence), D =13 mm, D =14mm.....	101
Tableau IV.12: Valeurs des contraintes maximales et minimales pour différents diamètres pour D =12 mm (cas de référence), D =13 mm, D =14mm.....	101
Tableau IV.13 : Valeurs des contraintes de Von Mises traitées par ABAQUS pour e = 1 mm (cas de référence), e = 3 mm, e = 4 mm.....	103
Tableau IV.14: Valeurs des contraintes maximales et minimales pour différentes épaisseurs pour e = 1 mm (cas de référence), e = 3 mm, e = 4 mm .....	104
Tableau IV.15: Valeurs de Von Mises simulées sous ABAQUS pour un point de soudure (D = 12 mm, cas de référence) et deux points de soudure parallèles (D = 8 mm chacun) .....	106
Tableau IV.16: Valeurs des contraintes maximales et minimales pour un point de soudure (D = 12 mm, cas de référence) et deux points de soudure parallèles (D = 8 mm chacun) .....	106
Tableau IV.17: Valeurs de Von Mises simulées sous ABAQUS pour deux points de soudure en série et en parallèle (D = 8 mm chacun) .....	109
Tableau IV.18: Valeurs des contraintes maximales et minimales pour deux points de soudure en série et en parallèle (D = 8 mm chacun) .....	109
<b>Tableau IV.19:</b> Valeurs de Von Mises : surface verticale vs horizontale pour c =1 mm ....	114

*Liste des tableaux*

---

Tableau IV.20: Valeurs des contraintes maximales et minimales : surface verticale vs horizontale pour  $c = 1$  mm .....114

*Table des matières*

*Remerciements*

*Dédicaces*

*Résumé*

*Liste des Abréviations*

*Liste des Figures*

*Liste des Tableaux*

*Tables des Matières*

*Introduction générale*

<b>I. Introduction .....</b>	<b>20</b>
I.1 Définition du procédé de soudage par résistance .....	20
I.2 Procédés de soudage par résistance.....	20
I.3 Le Soudage par Point .....	22
I.3.1 Définition .....	22
I.3.2 Principe du procédé.....	23
I.3.3 Constitution d'une machine a souder par point .....	25
I.3.4 Paramètres du procédé .....	26
I.3.5 Mécanisme de formation de la soudure .....	29
I.4 Caractéristiques d'un point soudé .....	29
I.4.1 Géométrie.....	29
I.4.2 Microstructure.....	31
I.4.3 Distance entre chaque point .....	33
I.4.4 Distance minimale entre le point de soudure et le bord de la pièce.....	34
I.4.5 Soudabilité .....	34
I.5 Soudabilité des aciers et traitements de soudage .....	37
I.5.1 Soudage des tôles revêtues.....	39
I.5.2 Soudage des aciers inoxydables.....	41
I.6 Conclusion.....	42
<b>II. Introduction.....</b>	<b>44</b>
II.1 Essai de traction .....	44
II.1.1 Principe .....	44
II.1.2 Éprouvette.....	44
II.1.3 Résultat de l'essai .....	46

II.1.3.1	Courbe brute de traction.....	46
II.1.3.2	Courbe conventionnelle de traction.....	47
II.1.3.3	Courbe rationnelle de traction.....	50
II.1.3.3.1	Relation entre $\sigma$ , $R_{te}$ et $e$ .....	51
II.1.3.3.2	Relation $\epsilon$ entre $\epsilon$ et $e$ .....	51
II.2	Essai de dureté.....	52
II.2.1	Essai de dureté Brinell.....	52
II.2.2	Essai de dureté Vickers.....	53
II.2.2.1	Méthode d'essai.....	53
II.2.3	Essai de dureté Rockwell.....	54
II.2.4	Recommandations pour le déroulement d'un essai de dureté.....	56
II.3	Essai de résilience.....	57
II.3.1	Principe.....	57
II.3.2	Éprouvette et essai.....	57
II.3.3	Dispositif expérimental.....	58
II.4	L'essai de fatigue.....	61
II.4.1	Éprouvette.....	62
II.4.2	Chargement.....	63
II.4.3	Résultats.....	64
II.4.3.1	Courbe de Wöhler.....	64
II.4.3.2	Dispersion des résultats.....	65
II.5	Quelques types d'essais destructifs appliqués aux soudures par points.....	66
II.5.1	Essai de déboutonnage.....	66
II.5.2	Essai de cisaillement par traction du point soudé.....	67
II.5.3	Essai de cisaillement par torsion du point soudé.....	67
II.5.4	Examen macrographique du point soudé.....	68
II.5.5	Essai de dureté Vickers à charge réduite.....	69
II.6	Conclusion.....	69
<b>III.</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>71</b>
III.1	Présentation du code de calcul par éléments finis ABAQUS.....	71
III.2	Logiciels sur le marché.....	71
III.3	Deux solveurs principaux.....	72
III.3.1	ABAQUS/Standard.....	72
III.3.2	ABAQUS/Explicit : Algorithme "Dynamique" Explicite.....	73
III.4	Présentation des différents types d'éléments ABAQUS.....	75
III.5	Systèmes d'unités dans le logiciel ABAQUS.....	75
III.6	Structure d'une analyse sous ABAQUS.....	75

## *Tables des matières*

---

III.7	Construction du présent modèle sous ABAQUS CAE.....	76
III.7.1	Modules d'ABAQUS/CAE.....	77
III.8	Conclusion :.....	83
<b>IV.</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>85</b>
IV.1	Concentration des contraintes .....	85
IV.2	Critères de plasticité de Von Mises.....	86
IV.3	Présentation des matériaux.....	87
IV.3.1	Acier DC03 .....	87
IV.3.2	Cuivre.....	88
IV.3.3	Paramètres utilisés .....	89
IV.4	Étude du cas de référence : assemblage acier-acier .....	90
IV.4.1	Distribution des champs mécaniques : contraintes et déplacements .....	90
IV.4.2	Champs de contraintes normales (S11, S22, S33) .....	92
IV.4.3	Déplacements selon les directions principales (U1, U2, U3) .....	94
IV.5	Étude paramétrique .....	95
IV.5.1	Influence du type de matériau.....	95
IV.5.2	Influence de la charge de traction .....	97
IV.5.3	Influence du diamètre .....	99
IV.5.4	Influence de l'épaisseur .....	102
IV.5.5	Influence du nombre de points de soudure .....	104
IV.5.6	Influence du positionnement des points de soudure .....	107
IV.5.7	Influence de la surface d'application de la charge de traction.....	110
IV.6	Conclusion.....	115
	Conclusion générale .....	116
	Références bibliographiques.....	118

## *Introduction générale*

Dans un contexte industriel marqué par des exigences croissantes en matière de légèreté, de performance et de sécurité, particulièrement dans les secteurs automobile et aéronautique, l'optimisation des techniques d'assemblage représente un enjeu stratégique majeur. Parmi ces techniques, le soudage par point se distingue comme une méthode d'assemblage largement répandue, offrant un excellent compromis entre rapidité d'exécution, fiabilité et coût de production. Cette technique, qui représente plus de 80% des points de soudure dans l'industrie automobile, s'avère particulièrement adaptée à l'assemblage des tôles métalliques en configuration à clin, où les pièces se chevauchent partiellement.

Cependant, malgré la maturité industrielle du procédé, la compréhension approfondie du comportement mécanique des joints soudés par point, notamment sous sollicitations uniaxiales, demeure un domaine de recherche actif. En effet, la complexité des phénomènes mis en jeu – qu'ils soient d'ordre thermique, métallurgique ou mécanique rend particulièrement délicate la prédiction de la tenue mécanique et des modes de défaillance de ces assemblages. Cette problématique est d'autant plus critique que la rupture d'un point de soudure peut compromettre l'intégrité structurale de l'ensemble de la structure, avec des conséquences potentiellement graves en termes de sécurité.

L'essor des outils numériques de simulation, notamment la méthode des éléments finis, offre aujourd'hui de nouvelles perspectives pour analyser et prédire le comportement des joints soudés par point sous diverses conditions de chargement. Ces outils permettent non seulement de mieux comprendre les mécanismes de défaillance, mais également d'optimiser les paramètres de soudage sans recourir systématiquement à des campagnes d'essais expérimentaux coûteuses et chronophages.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce mémoire de master, dont l'objectif principal est d'étudier l'effet du chargement uniaxial sur le comportement mécanique d'un joint soudé type à clin, à travers une approche combinant analyse théorique, caractérisation expérimentale et modélisation numérique. Cette démarche vise à établir des corrélations robustes entre les paramètres de soudage, les caractéristiques géométriques et métallurgiques du point de soudure, et la résistance mécanique de l'assemblage sous différentes conditions de sollicitation.

## *Introduction générale*

---

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à une présentation approfondie du soudage par point, abordant ses principes fondamentaux, ses variantes technologiques et ses applications industrielles. Une attention particulière est portée aux spécificités du soudage des assemblages à clin, configuration qui présente des défis particuliers en termes de répartition des contraintes et de modes de rupture.

Le deuxième chapitre propose une revue détaillée des différentes méthodes de caractérisation mécanique des assemblages par soudage par point. Les essais standardisés (traction-cisaillement, traction en croix, arrachement, etc.) sont analysés en termes de pertinence, de représentativité vis-à-vis des sollicitations réelles, et de capacité à révéler les mécanismes de défaillance spécifiques aux joints soudés à clin. Cette partie intègre également une réflexion sur les critères d'évaluation de la qualité des points de soudure et sur les méthodologies d'interprétation des résultats d'essais.

Le troisième chapitre constitue le cœur de ce travail de fin d'étude, présentant la modélisation et la simulation numérique des joints soudés par point à l'aide du logiciel ABAQUS. Cette approche numérique, permet d'analyser en détail l'influence de paramètres tels que le diamètre du point de soudure, l'épaisseur des tôles, ou encore les propriétés mécaniques locales sur la résistance et les modes de rupture de l'assemblage sous chargement uniaxial. Des études paramétriques sont conduites pour identifier les configurations optimales et proposer des recommandations concrètes pour l'amélioration de la tenue mécanique des joints soudés par point.



# *Chapitre I*

## *Soudage par point*

## I. Introduction

Le soudage par points est une technique couramment utilisée dans l'industrie pour assembler des tôles métalliques, notamment dans les secteurs de l'automobile, de l'aéronautique et de la construction. Ce procédé repose sur la création d'un point de fusion localisé à l'interface de deux tôles sous l'effet combiné de la pression et du courant électrique. La création d'une zone fondue, puis sa solidification, permet de réaliser un joint solide et durable entre les matériaux.

Les paramètres du procédé, tels que l'effort de soudage, l'intensité du courant, le temps de soudage et le temps de maintien, jouent un rôle crucial dans la qualité du point de soudure. De plus, les électrodes utilisées dans ce procédé influencent la zone de soudure, la conductivité thermique et la capacité à dissiper la chaleur, contribuant ainsi à la réussite de l'assemblage.

Le présent travail propose une exploration des différents paramètres influençant le soudage par points, ainsi qu'une analyse approfondie de l'importance de chaque paramètre pour le contrôle et l'optimisation du procédé.

### I.1 Définition du procédé de soudage par résistance

Le soudage par résistance est un procédé de soudage sans métal d'apport, qui repose sur les effets combinés d'une pression mécanique et d'un courant électrique traversant les pièces à souder. Ces pièces, généralement de faible épaisseur, sont positionnées l'une sur l'autre et serrées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre. Le courant de soudage, appliqué sous une faible tension, traverse les pièces ainsi que les électrodes et génère une élévation rapide de la température due à l'effet Joule. Cela provoque la fusion du matériau à la jonction des pièces, formant ainsi un noyau de matière en fusion qui permet de réaliser la soudure.

### I.2 Procédés de soudage par résistance

Les procédés de soudage par résistance sont variés et aptes à différents types de pièces et assemblages :

- **Soudage par bossages ou protubérances** : Ce procédé est utilisé pour assembler des composants annulaires, où les pièces sont dotées de petites protubérances. Le soudage

par bossages est généralement étanche, et les joints formés présentent une bonne résistance mécanique.

- **Soudage à la molette :** Ce procédé implique une soudure par recouvrement continu entre les pièces. Il est souvent utilisé pour des assemblages de tôles ou de feuilles métalliques et permet d'obtenir une soudure étanche et résistante.
- **Soudage par points :** Il s'agit d'un soudage par recouvrement discontinu, dans lequel des points de fusion sont réalisés sur des zones localisées des pièces à assembler. Ce procédé est couramment utilisé pour les assemblages de tôles, où la chaleur générée par le courant électrique permet de fusionner des zones restreintes de manière précise et rapide. [1]

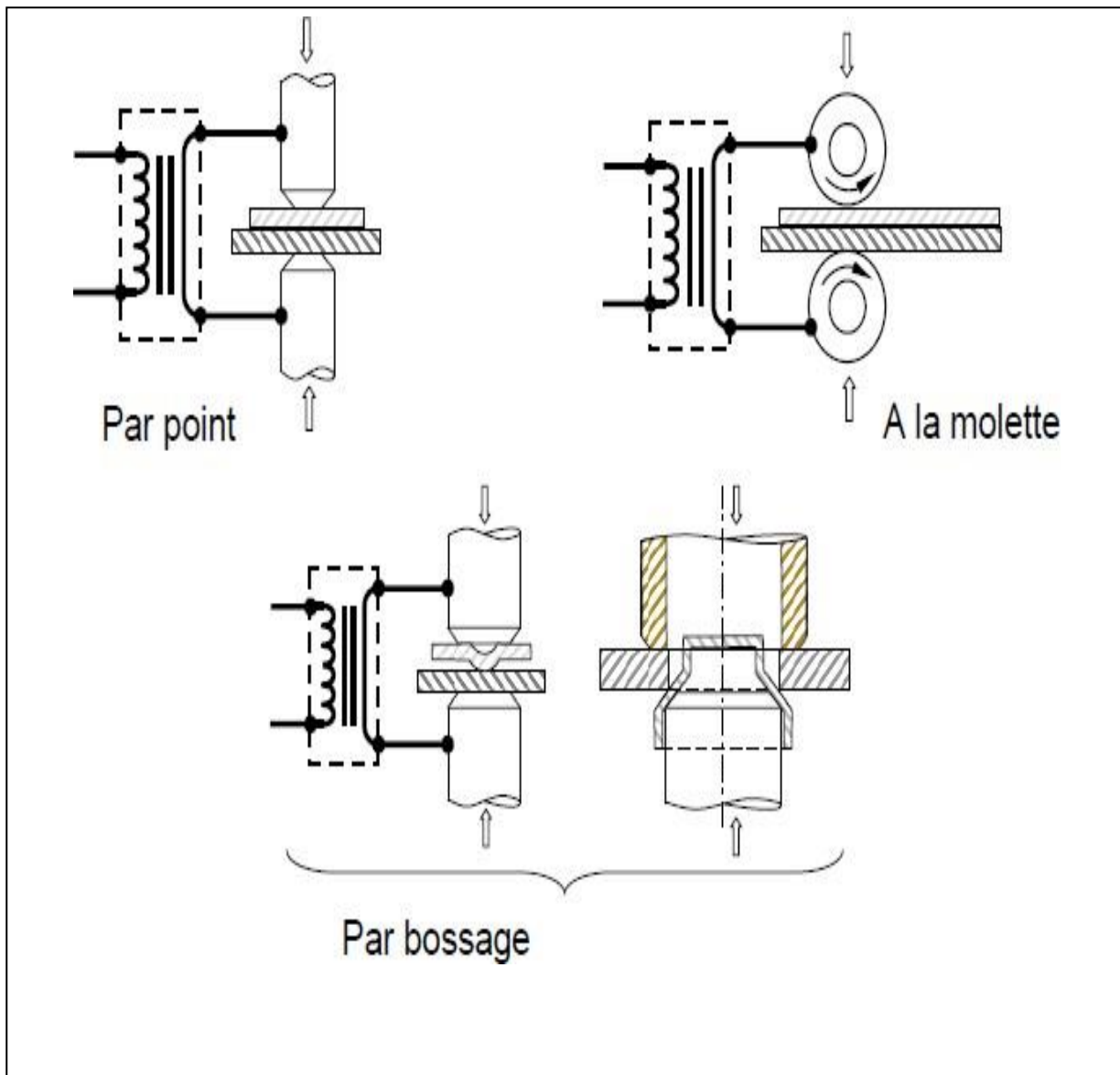
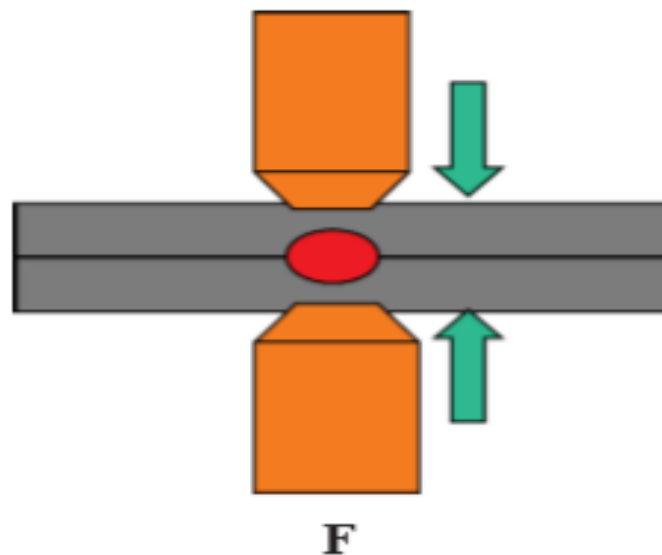


Figure I.1: Principaux soudage par résistance

## I.3 Le Soudage par Point

### I.3.1 Définition

Le soudage par point est un procédé autogène, c'est-à-dire sans métal d'apport. La fusion du métal localisé entre les tôles à assembler est obtenue par l'effet Joule, généré par un courant électrique de plusieurs kiloampères. Les pièces à souder sont superposées et comprimées localement entre deux électrodes en alliage de cuivre. Le courant traverse l'ensemble pièce/électrode, provoquant une élévation de température et la fusion localisée des tôles dans la zone de contact des électrodes. [2]



**Figure I.2:** Soudage par points [3]

En France, ce procédé est désigné par "Soudage par Point" (SP), tandis qu'aux États-Unis, il est connu sous le nom de Resistance Spot Welding (RSW).

### Loi de Joule

L'effet Joule est exprimé par la relation suivante :

$$w = t \times I^2 \times R \quad (\text{I.1})$$

Où  $W$  représente l'énergie thermique dégagée (en joules),  $I$  l'intensité du courant (en ampères),  $R$  la résistance (en ohm) et  $t$  le temps (en secondes).

## La résistivité

La résistivité ( $\rho$ ) d'un matériau décrit sa capacité à résister au passage du courant électrique. Elle permet de calculer la résistance d'un matériau par la formule suivante :

$$R = \rho \times \frac{L}{S} \quad (\text{I.2})$$

Où  $R$  est la résistance (en ohm),  $\rho$  la résistivité (A/M),  $L$  la longueur du matériau (en mètres) et  $S$  sa section transversale (en m<sup>2</sup>).

## Résistance et température

La résistance d'un métal augmente avec la température, ce qui est exprimé par la relation suivante :

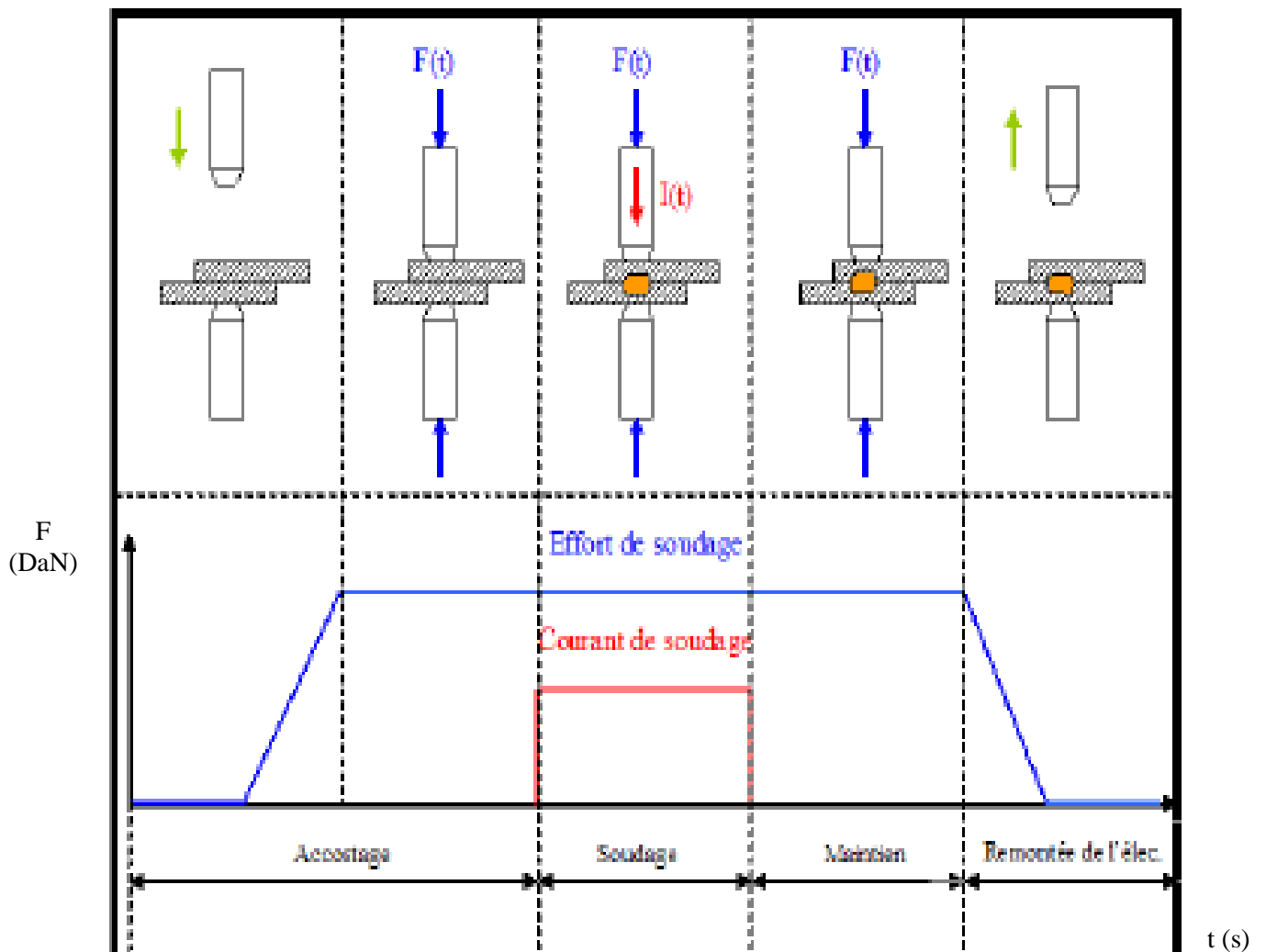
$$R(T^1) = R(T^0) \times (1 + \alpha \cdot (T^1 - T^0)) \quad (\text{I.3})$$

Où  $R$  est la résistance (en ohm),  $T$  la température (en kelvin) et  $\alpha$  le coefficient de température (en K<sup>-1</sup>).

### I.3.2 Principe du procédé

Le soudage par points, illustré dans la figure ci-dessous, consiste à maintenir deux tôles d'acier en contact entre deux électrodes. Ce contact est assuré par un courant de forte intensité, qui génère un noyau fondu à l'interface des tôles. En refroidissant, ce noyau fixe localement les tôles entre elles.

Un cycle de soudage, comme montré dans la Figure I.3, se divise en trois phases principales :



**Figure I.3:** Les phases de soudage par point

1. **L'accostage** : Les électrodes se rapprochent pour comprimer les pièces à souder à l'endroit prévu, sous un effort précis. Dans le cas de la soudeuse du CRDM, l'électrode supérieure descend tandis que l'électrode inférieure reste fixe. Cette phase se termine lorsque l'effort est stabilisé.
2. **Le soudage** : Un courant électrique est déclenché par la fermeture du contacteur du circuit de puissance. L'effet Joule génère la chaleur nécessaire pour créer une zone fondue à l'interface entre les tôles. La résistance au contact entre les tôles, au début du soudage, est plus élevée que la résistance des tôles à température ambiante, ce qui fait chauffer l'interface plus rapidement. À mesure que la température augmente, la résistance diminue, favorisant ainsi la progression du noyau fondu et de la zone affectée thermiquement (ZAT) au sein de l'assemblage.

3. **Le maintien** : Cette phase vise à solidifier le noyau fondu et la ZAT. La qualité du point de soudure, ainsi que la résistance métallurgique et mécanique, dépendent directement de la durée de cette phase. Les pièces sont maintenues sous pression, généralement égale à celle utilisée lors de la phase de soudage. La chaleur est dissipée via un circuit de refroidissement à travers les électrodes. La durée du temps de maintien est normalement équivalente à celle du soudage. À la fin du cycle, l'électrode supérieure remonte, permettant à l'ensemble des tôles de se déplacer pour procéder à un nouveau soudage par point. [4]

### I.3.3 Constitution d'une machine à souder par point

- Un transformateur de courant de soudage (il abaisse la tension, il augmente le courant).
- Un dispositif de pression des électrodes (manuel, pneumatique ou électrique).
- Un dispositif de commande du cycle de soudage (séquenceurs).
- Un circuit de refroidissement. [5]

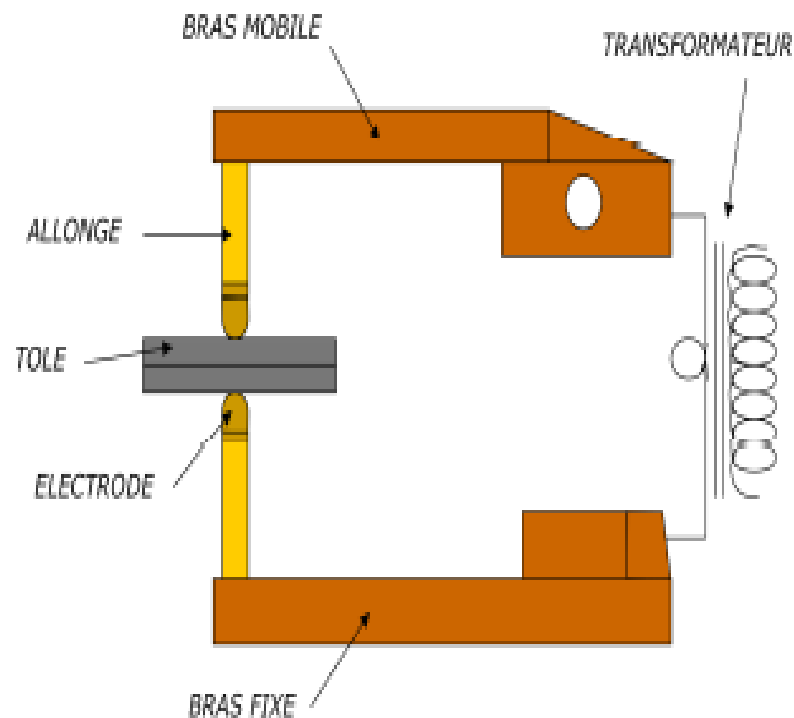


Figure I.4 : Mécanisme du soudage par point

### I.3.4 Paramètres du procédé

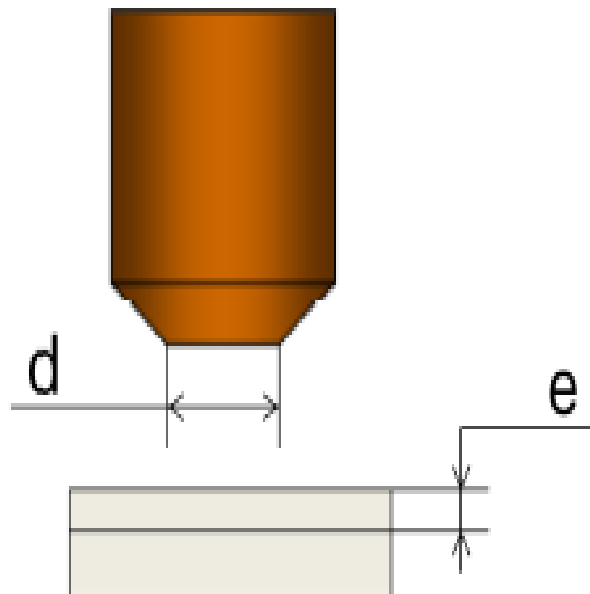
Les paramètres de soudage sont adaptés selon les propriétés des tôles à assembler. Les principaux paramètres, présentés dans l'ordre chronologique du procédé, sont l'effort de soudage, l'intensité, le temps de soudage, et le temps de maintien.

- **Effort de soudage** : Cet effort est appliqué dès la phase d'accostage et sa valeur dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques et de l'épaisseur des tôles à souder. En pratique, l'évolution de l'effort pendant cette phase n'est pas linéaire, mais dépend des systèmes de mise en charge de la soudeuse (voir Figure I.3).
- **Intensité de soudage** : L'intensité de soudage est un paramètre clé pour générer l'énergie nécessaire. Elle gouverne la production de chaleur par effet Joule. L'intensité utilisée peut être en courant alternatif monophasé (AC-50Hz) ou en courant continu à moyenne fréquence (MFD-1000Hz).
- **Temps de soudage** : Ce paramètre intervient pendant la phase de chauffage. En général, ce temps est de l'ordre de quelques dixièmes de seconde. Sa durée dépend de la nuance de l'acier et de son épaisseur. Dans certains cas de soudage de tôles épaisses et à haute résistance mécanique, le courant pulsé est souvent appliqué pour stabiliser le développement du noyau. Ce processus implique des cycles de chauffe séparés par des périodes de maintien ou de refroidissement. Le nombre de cycles supplémentaires pour le traitement thermique est souvent ajusté selon les besoins des tôles haute résistance.
- **Temps de maintien** : Ce temps est essentiel pour la solidification, car il permet l'évacuation de la chaleur de l'assemblage vers le circuit de refroidissement. La détermination de ce paramètre se base sur des normes telles que la norme française (NFA 87-001) ou la norme ISO-18278/2.
- **Électrodes** : Les électrodes jouent un rôle fondamental dans ce procédé. Un modèle couramment utilisé présente une électrode de forme tronconique avec une face active hémisphérique (voir Figure I.5). L'électrode influe directement sur la qualité de la soudure, notamment en contrôlant la taille du contact à l'interface, grâce à son profil de face active. L'électrode remplit trois rôles principaux :
  - **Mécanique** : Pendant la phase de serrage, l'électrode assure le contact entre les tôles et applique la force nécessaire pour le soudage.

- **Électrique** : Elle permet le passage du courant de soudage sans chauffer à l'intérieur. Elle doit donc avoir une excellente conductivité thermique.
- **Thermique** : L'électrode sert de passage pour évacuer la chaleur de la zone chaude vers le circuit de refroidissement. Pendant le soudage, la chaleur générée à l'interface électrode/tôle doit être rapidement dissipée pour éviter que la zone fondue n'atteigne l'interface électrode. Le matériau de l'électrode doit donc avoir une bonne capacité calorifique et une conductivité thermique optimale.

Les alliages de cuivre (Cu-Cr, Cu-Zr, et Cu-Cr-Zr) sont souvent utilisés pour la fabrication des électrodes en raison de leurs bonnes performances mécaniques à haute température et de leur excellente conductivité électrique et thermique. [2]

Diamètre de la face active d'électrode  $d = 2 e + 3$  (mm)



**Figure I.5** : Électrode de la soudure par point

La géométrie de l'électrode varie en fonction de l'application. Le profil de la face active et le diamètre de l'électrode influencent directement le processus de soudage (voir Figure I.6).

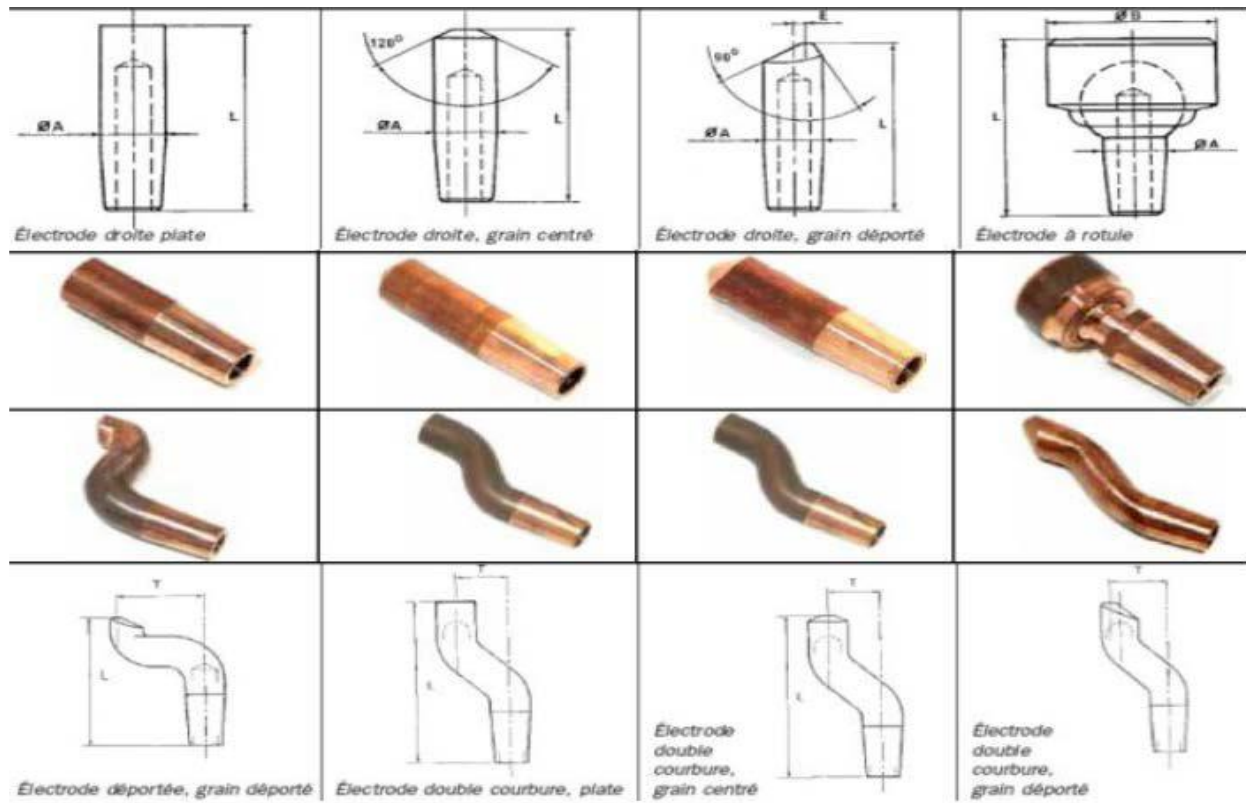
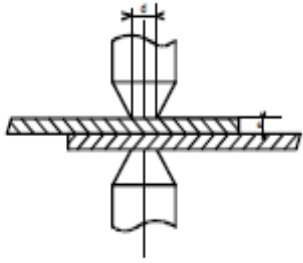
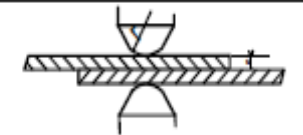
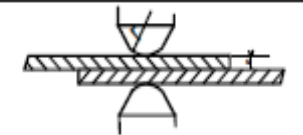


Figure I.6 : Différents formes des électrodes de la soudure par point

Tableau I.1: Parametre de soudage par point

Épaisseur e la plus faible (mm)	Diamètre électrode d (mm)	Intensité de soudage (A)	Temps de soudage (s)	Effort de forgeage (daN)	
0,5	5	7700	0,10		Soudage d'aciers doux 
1	6	8800	0,15		
1,5	6,5	9800	0,23		
2	8	11800	0,31		
3	11	14900	0,60	700	
4	13	18000	0,90	1350	
5	15	20800	1,37	2000	
6	16	24000	1,82	3100	
7	18	27800	2,50	3400	
8	19	31800	3,15	4200	
9	20	36000	4	5000	
10	21	40000	5	5900	
0,5	4	4000	0,06		Soudage d'aciers inoxydables 
1	5	7800	0,10		
1,5	6,5	10700	0,16		
2	8	14000	0,24		
3	9,5	16500	0,34		
0,5	r = 50	18000	0,08		Soudage d'alliages d'aluminium 
1	75	30700	0,14		
1,5	75	35000	0,27		
2	100	42000	0,28		
3	100	63000	0,30		

### I.3.5 Mécanisme de formation de la soudure

La chaleur servant à faire fondre l'acier au niveau du contact tôle -tôle est créée par l'effet joule durant le passage du courant dans les conducteurs. La quantité de chaleur dégagée pendant la durée t en fonction de l'intensité du courant et de la résistance électrique traversée est donnée par la relation :

$$Q = \int R \cdot I^2 \cdot dt \quad (I.4)$$

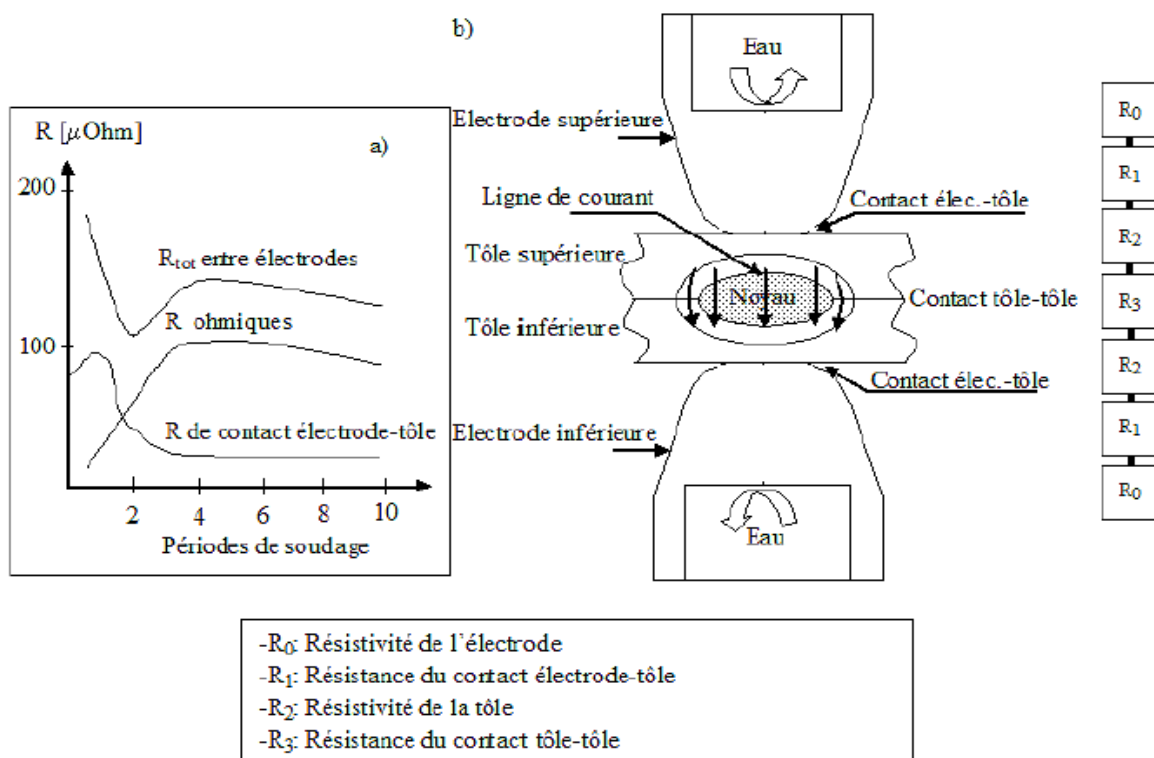


Figure I.7: Mécanisme de formation de point de soudure de soudage par point

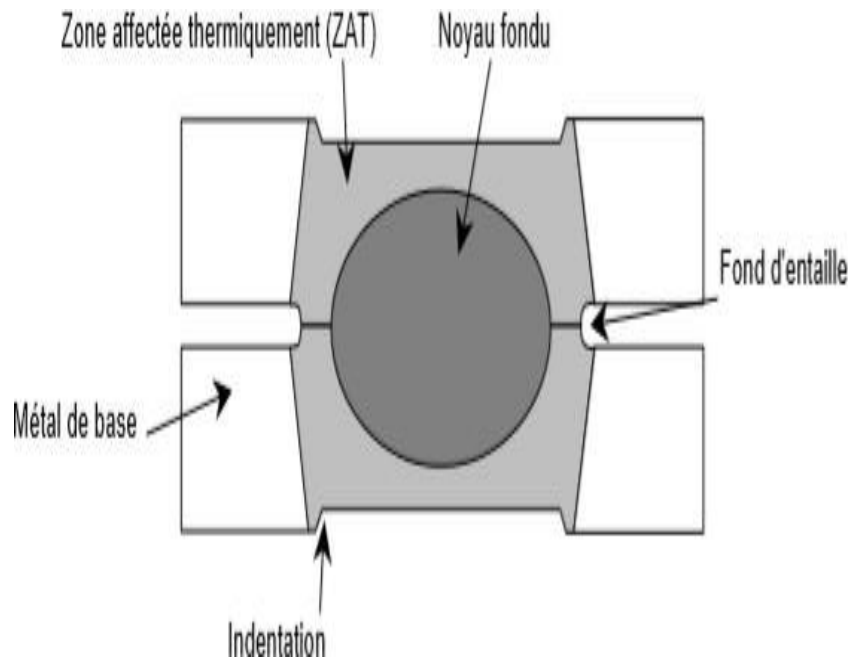
## I.4 Caractéristiques d'un point soudé

### I.4.1 Géométrie

La géométrie d'un point soudé présente trois caractéristiques principales :

- Une discontinuité de l'assemblage,
- La présence d'une entaille qui concentre les contraintes lors de sollicitations mécaniques,

- Une indentation des faces externes de l'assemblage causée par la pénétration des électrodes. [6]



**Figure I.8:**Schéma d'un point soudé selon une coupe [6]

La résistance mécanique d'un point soudé est surtout influencée par la taille du noyau fondu, et en particulier par son diamètre dans le plan des deux tôles. Si la puissance électrique fournie est trop faible, le noyau fondu sera trop petit, voire inexistant, ce qui pourrait compromettre les propriétés mécaniques du point soudé. En augmentant la puissance, la zone fondue s'étend et la résistance du point augmente. Toutefois, si la puissance devient trop élevée, le noyau fondu peut atteindre le fond de l'entaille ou une des faces extérieures de la tôle, entraînant l'éjection de métal fondu (phénomène d'expulsion), ce qui dégrade la qualité du point soudé.

Trois zones principales peuvent être identifiées dans un point soudé :

1. **Le noyau fondu :** Cette zone, où l'acier est passé à l'état liquide puis a refroidi rapidement, est cruciale pour la résistance du point.
2. **La zone affectée thermiquement (ZAT) :** C'est la région où la microstructure du métal de base a été modifiée par l'effet thermique du procédé de soudage. On considère que cette zone est celle où l'acier a été soumis à des températures d'environ 600 °C.

3. **Le métal de base (MB)** : Cette zone n'a pas subi de modifications microstructurales et reste inchangée après le soudage. [7]

#### I.4.2 Microstructure

Le soudage par points se distingue par un cycle thermique très rapide (illustré par la Figure I.9), qui modifie profondément la microstructure du métal de base à proximité du point de soudure. Le métal est chauffé à une vitesse atteignant plusieurs milliers de degrés Celsius par seconde, pouvant dépasser la température de fusion. Ce chauffage est suivi d'un refroidissement très rapide, dont la vitesse dépend des paramètres de soudage. Un cycle complet de soudage par point dure généralement moins d'une seconde. À l'échelle microscopique, plusieurs zones sont observées, comme le montre la Figure I.9 : [6]

- **La zone du métal de base (MB)** : La température dans cette zone reste inférieure à environ 600°C, ce qui n'entraîne aucune modification structurelle notable.
- **La zone subcritique (SCZAT)** : La température maximale atteint entre 600°C et Ac1. Bien que la taille des grains ne soit généralement pas modifiée, certains changements métallurgiques peuvent survenir, comme la dissolution partielle du carbone lors du chauffage et des phénomènes de précipitation ou de coalescence au refroidissement.
- **La zone intercritique (ICZAT)** : La température dans cette zone se situe entre Ac1 et Ac3. Cela entraîne une austénitisation partielle (coexistence de ferrite  $\alpha$  et d'austénite  $\gamma$ ), entraînant des modifications importantes de la microstructure.
- **La zone à grains fins (GFZAT)** : Cette zone, avec une température entre Ac3 et environ 1100°C, connaît une austénitisation totale. La structure austénitique qui en résulte est fine et non homogène, et après refroidissement rapide, une structure bainite-martensitique fine se forme.
- **La zone à gros grains (GGZAT)** : Dans cette zone, avec une température entre environ 1100°C et la température de fusion, la croissance du grain austénitique est importante, ce qui augmente la trempabilité de la zone. Après un refroidissement rapide, la microstructure obtenue est généralement martensitique et homogène.

- **La zone fondue (ZF)** : Au-delà de la température de liquidus, cette zone présente une microstructure dendritique, plus grossière au centre du point et plus fine en périphérie du noyau, avec une possible ségrégation interdendritique. [8]

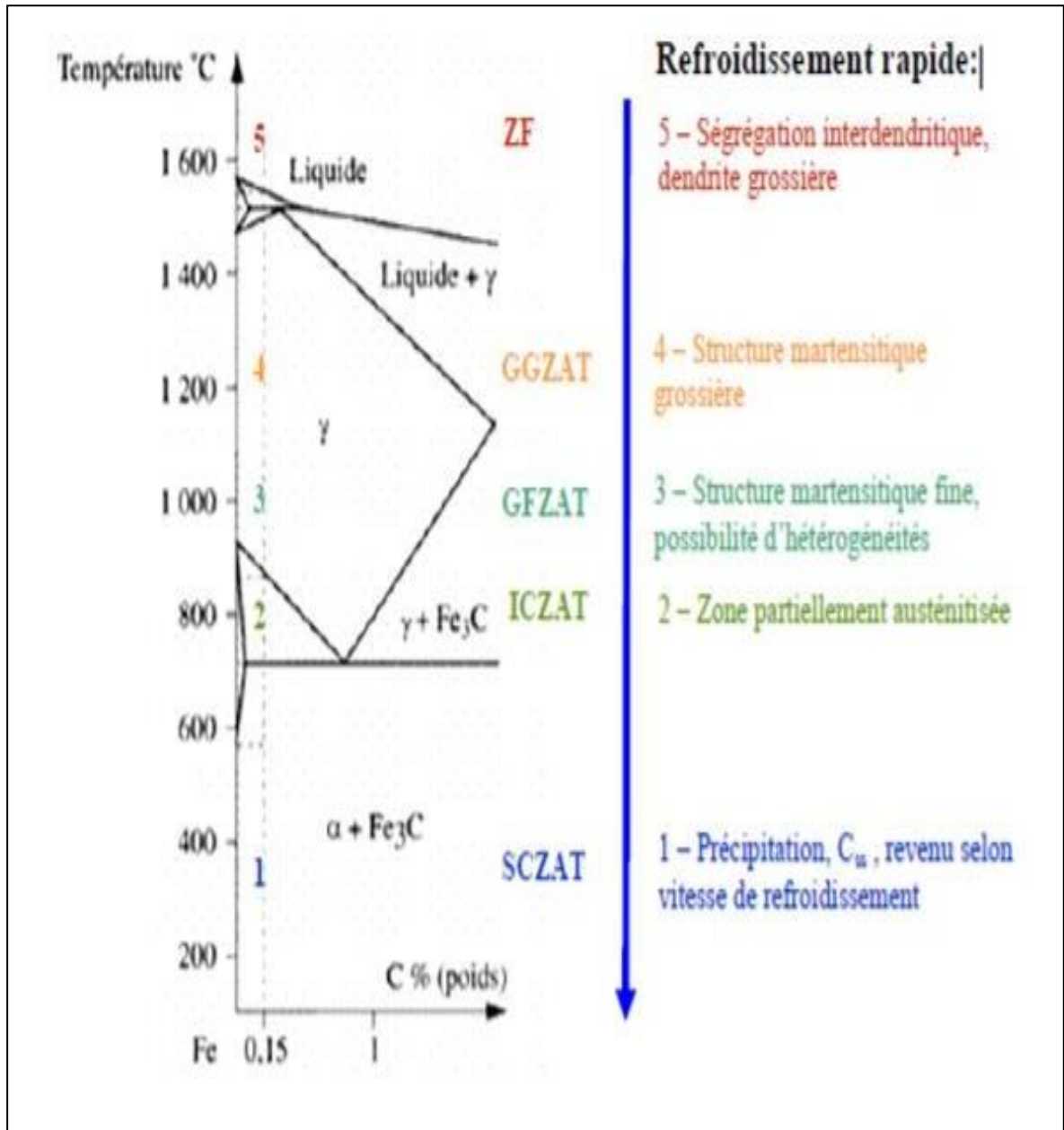


Figure I.9: Microstructures générées par l'opération de soudage [9]

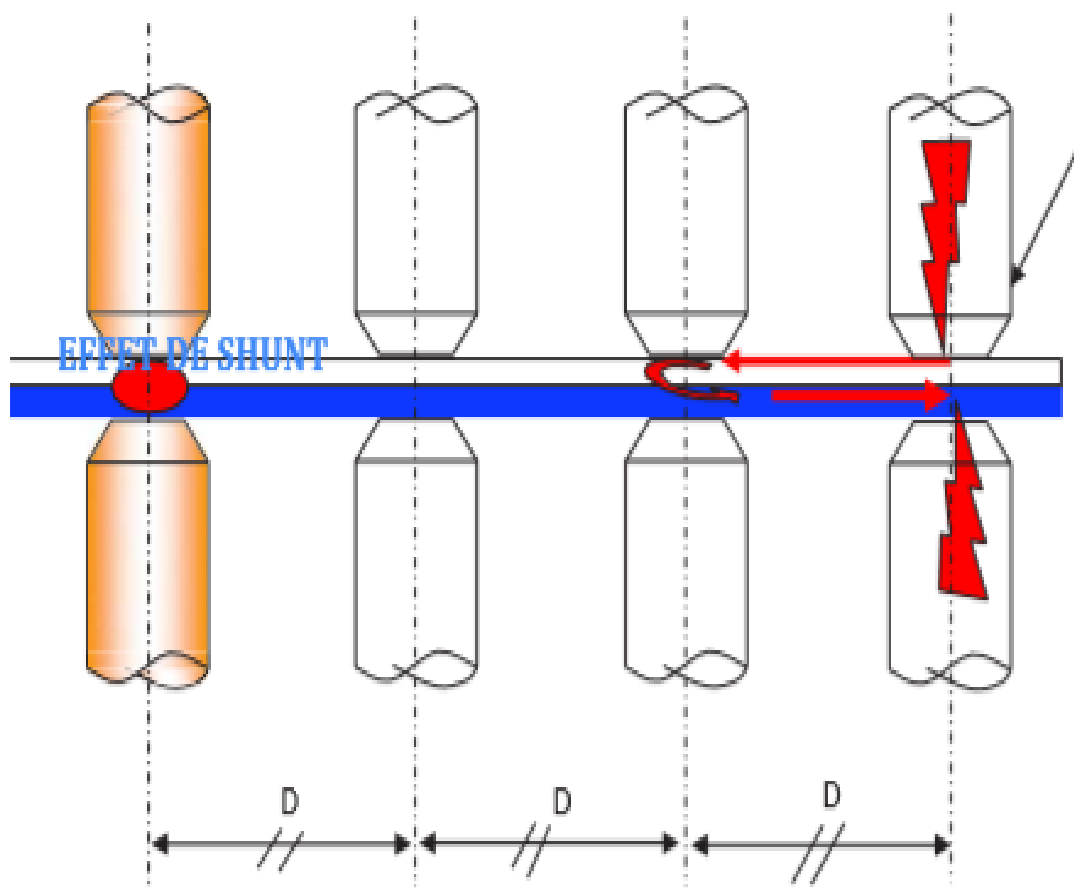
### I.4.3 Distance entre chaque point

La distance entre deux points de soudure doit être  $10 \times \text{épaisseur} + 10 \text{ mm}$  pour éviter l'effet de shunt du courant de soudage

Qu'est-ce que l'effet de shunt ?

L'effet de shunt se produit lorsque la distance entre deux points de soudure n'est pas correcte. Dans ce cas, le courant ne passe pas d'une électrode à l'autre à travers la pièce à assembler, mais plutôt par un point de soudure déjà existant, sans réaliser un nouveau point de soudure. Cela empêche la formation de nouveaux points. [10]

La formule de la distance est donc :  $D = 10 \times e + 10 \text{ mm}$  (voir Figure I.10)



$$D = 10e + 10 \text{ mm}$$

Figure I.10 : Distance entre chaque point [10]

#### I.4.4 Distance minimale entre le point de soudure et le bord de la pièce

La distance entre le bord de la pièce et le point de soudure doit être environ deux fois l'épaisseur minimale de la pièce, plus 4 mm. Cela permet d'éviter l'éclatement du point de soudure dû à la pression hydrostatique exercée par le noyau en fusion.

#### I.4.5 Soudabilité

Ce matériau offre une excellente soudabilité par points, aussi bien pour des assemblages homogènes que hétérogènes, tant à 50 Hz qu'à 1000 Hz. Les plages de soudabilité sont étendues, et les propriétés mécaniques des assemblages (traction, cisaillement) respectent les exigences des constructeurs automobiles ainsi que les normes en vigueur. Grâce à la composition de la couche alliée obtenue après emboutissage à chaud, la durée de vie des électrodes de soudage est très longue, permettant de réaliser plusieurs milliers de points sans dégradation, contrairement aux revêtements métalliques conventionnels. En raison de sa haute résistance mécanique et de sa faible ductilité, l'utilisation de paramètres de soudage standards peut entraîner des projections de soudure, ce qui peut conduire à des défauts comme des fissures et à une dégradation de la surface du point soudé. Pour limiter ces défauts, il est recommandé d'utiliser une intensité de soudages relativement bas (voir Figure I.11), un temps de soudage plus long (voir Figure I.12) et un effort de serrage plus élevé (voir Figure I.13). Il est également possible d'augmenter le diamètre de la face active de l'électrode afin de réduire la densité de courant par unité de surface. [8]

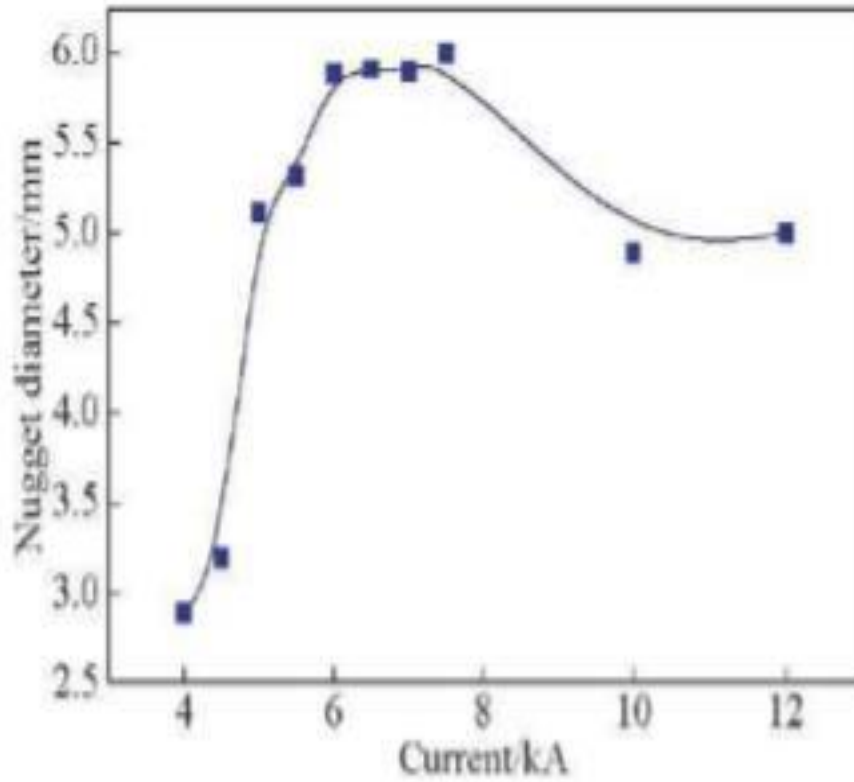


Figure I.11: Effet du courant de soudage sur le diamètre du noyau soudé [8]

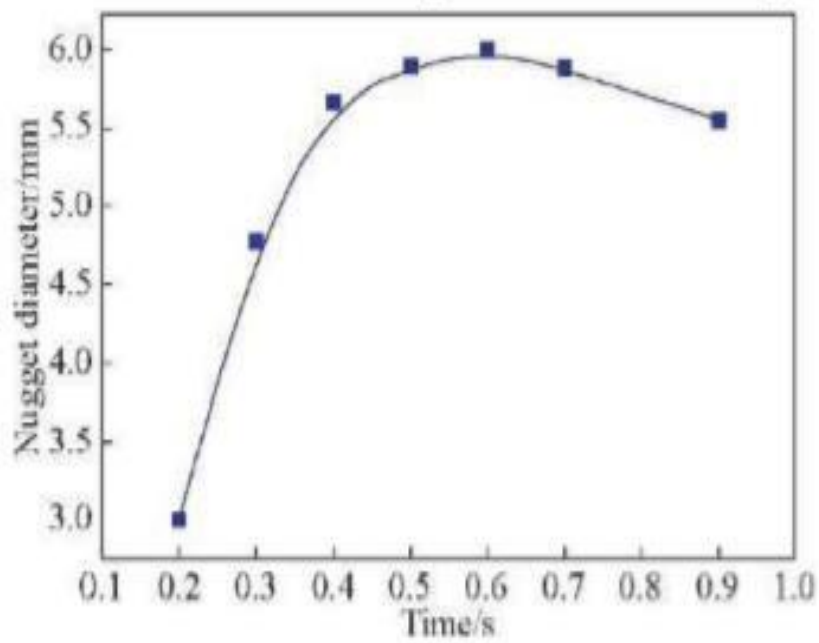
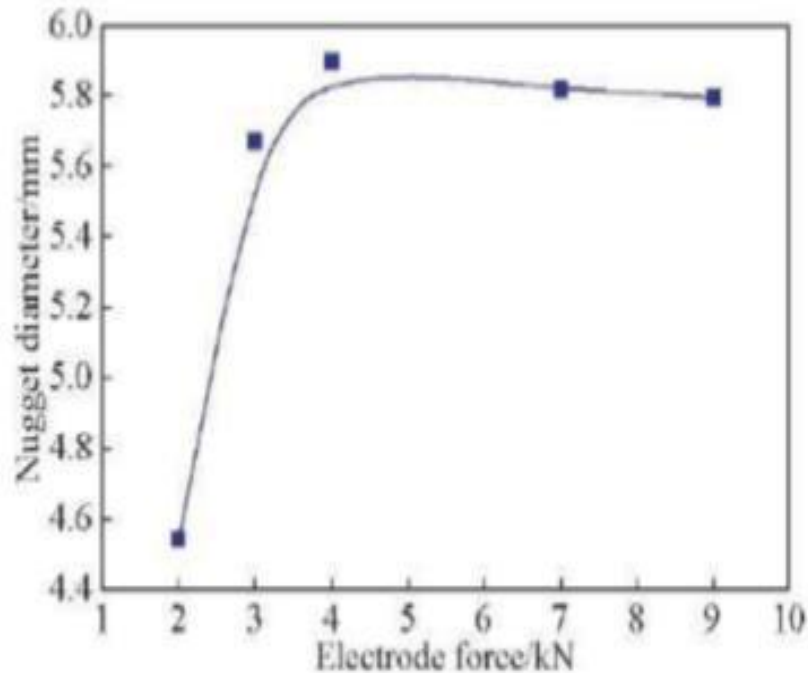


Figure I.12: Effet du temps de soudage sur le diamètre de noya [8]



**Figure I.13:** Effets de l'effort aux électrodes sur le diamètre du noyau soudé [9]

➤ **Soudabilité opératoire**

La soudabilité opératoire repose sur un ensemble de conditions permettant de réaliser l'opération de soudage sans problème, telles que la fiabilité mécanique, électrique et thermique des machines, ainsi que la qualité du matériau (résistivité, conductivité, aspect de surface, etc.). Le coefficient d'aptitude au soudage par résistance (C.A.S.P.R.) permet de définir la soudabilité opératoire des matériaux. Par exemple, les valeurs du C.A.S.P.R. pour différents matériaux sont : [9]

$$C.A.S.P.R = \frac{\textit{résistivité}}{\textit{temps de fusion} \times \textit{conductivité thermique}} \quad (\text{I.5})$$

Aluminium = 0.76

- Nickel = 4.66
- Acier doux = 6.35
- Acier inoxydable = 144

### ➤ Soudabilité métallurgique

Même si la liaison est réalisée, l'assemblage peut ne pas être satisfaisant d'un point de vue métallurgique. Selon les matériaux en présence et le cycle thermique appliqué, l'assemblage peut présenter des faiblesses. En général, plus le domaine de soudabilité est situé vers les hautes intensités, plus l'énergie nécessaire pour réaliser un bon diamètre de noyau est élevée. De plus, plus le domaine de soudabilité est étroit, plus le réglage de la machine de soudage devient délicat. Nos études se concentrent sur la taille maximale du noyau, l'intensité à utiliser en haut du domaine de soudabilité, ainsi que sur la validation de la taille et de la forme de la soudure.

Le soudage par points est l'un des procédés les plus répandus parmi les procédés de soudage par résistance, utilisé dans les industries légères et lourdes. Cela est dû à sa simplicité d'utilisation et aux caractéristiques mécaniques que l'on peut obtenir grâce à ce procédé. [9]

## I.5 Soudabilité des aciers et traitements de soudage

L'acier est un alliage constitué de fer et de carbone, dont la teneur en carbone varie. Le fer possède une structure cristalline qui évolue en fonction de la température, tandis que le carbone, un semi-conducteur réfractaire, a une solubilité dans le fer qui dépend également de la température. Lors du soudage par résistance, tout le carbone est libéré. Cependant, en raison de la quantité présente et du refroidissement rapide, la dilution du carbone ne se fait pas de manière homogène à travers les différentes phases allotropiques traversées, ce qui peut entraîner des effets métallurgiques non souhaités

Le Tableau I.2 regroupe les principaux paramètres recommandés pour le soudage par point de l'acier doux. Ces paramètres, comme le courant ou le temps d'impulsion, permettent d'assurer une soudure efficace et de bonne qualité.

Tableau I.2: Paramètre recommandé pour le soudage de l'acier doux

Valeurs communes à toutes les catégories de soudure par points		Régime pour obtenir des soudures de catégorie A				B				C				D				E							
		Points très sollicités*				Points de fatigue				Points peu sollicités				Toléré industrielle courante				Mobilier - Ventilation							
		Soudage rapide				Soudage rapide				Soudage rapide				Soudage rapide				Soudage rapide							
e : mm	D : mm	L : mm	P : mm	T <sub>≡</sub> -	E : daN	I : Amp	d' : mm	R : kgf	T <sub>≡</sub> -	E : daN	I : Amp	d' : mm	R : kgf	T <sub>≡</sub> -	E : daN	I : Amp	d' : mm	R : kgf	T <sub>≡</sub> -	E : daN	I : Amp	d' : mm	R : kgf	e : mm	
0,25	9,5	3,2	5,4	9,5	3/4	91	4500	3,3	106	4	59	3700	3,2	91	12	29	3000	2,5	60	20	30	3400	2,5	50	0,25
0,5	9,5	4	9,5	11	5	130	6100	4,3	240	8	91	5100	4,1	208	18	48	3000	3,5	110	60	30	3500	2	80	0,5
0,8	9,5	4,8	12,7	11	6	180	8000	5	440	12	125	6300	5,1	385	24	61	4700	4,6	195	65	35	3900	2,5	160	0,8
1	12,7	5	19	12	8	230	9500	5,8	610	17	163	7500	5,6	556	31	81	5600	5,3	360	75	40	4000	3	250	1
1,3	12,7	6	22	14	10	295	10500	6,3	825	20	186	8000	5,8	770	35	93	6100	5,6	400	80	50	4200	3,5	300	1,3
1,6	12,7	6,4	27	16	11	362	11600	6,9	1060	24	227	9000	6,6	975	40	113	6800	6,4	570	90	60	4500	4	480	1,6
2	16	7	35	17,5	17	498	13300	7,9	1463	30	293	10400	7,6	1370	48	147	7900	7,1	1000	110	80	5000	5	740	2
2,5	16	8	40	19	21	590	14700	8,6	1865	36	358	11400	8,4	1766	55	177	8800	7,9	1400	130	110	5500	6	1100	2,5
2,8	16	9,5	46	20	24	725	16100	9,4	2406	41	435	12200	9,1	2293	60	217	9500	8,9	2197	140	120	5800	6	1200	2,8
3	16	9,5	50	22	25	815	17500	10,2	3128	50	516	12900	9,9	2944	65	259	10000	9,4	2786	150	120	6000	7	1700	3
3,5	20	10,3	57	26	34	925	18200	11,2	3880	60	635	14100	11,4	4200	85	280	10600	10,2	3380	170	120	6000	7	1700	3,5
4	20	11	66	32	41	1030	18900	11,9	4750	70	635	14100	11,4	4200	104	317	11000	10,7	3900	170	120	6000	7	1700	3,5
4,3	20	11,1	76	38	50	1120	19500	12,9	5200	89	715	14700	12,2	4870	126	358	11400	11,4	4420	170	120	6000	7	1700	3,5
4,7	20	11,9	82	41	60	1255	20200	13,7	6050	106	800	15300	13	5450	152	400	11750	11,9	5040	170	120	6000	7	1700	3,5
5	20	12,7	88	44	70	1320	20900	14,7	6700	122	880	15900	13,7	6100	175	440	12200	12,7	5600	170	120	6000	7	1700	3,5
5,5	25	13,3	98	47	79	1450	21600	15,5	7300	138	970	16450	14,5	6880	197	485	12500	13,2	6120	170	120	6000	7	1700	3,5
5,8	25	13,5	108	54	88	1560	22300	16,5	8050	155	1040	17000	15,2	7350	221	520	12900	13,2	6120	170	120	6000	7	1700	3,5
6,3	25	14,3	115	57	96	1750	23000	17,3	8550	170	1140	17600	16	7950	241	570	13200	14,5	7230	170	120	6000	7	1700	3,5
6,6	25	15	121	60	106	1850	23600	18	9390	185	1230	18100	16,8	8500	265	617	13600	15	7770	170	120	6000	7	1700	3,5
7	25	15	133	66	116	2000	24400	19	9850	205	1310	18700	17,5	9000	291	650	14000	15,7	8370	170	120	6000	7	1700	3,5
8	30	16	146	73	135	2400	25700	20,8	10600	235	1460	19800	18,8	10000	337	740	14800	17	9000	170	120	6000	7	1700	3,5
Pénétration du noyau (p) %		70 - 75																							
Inclinaison (a) % de e		3 à 4,5																							
Soulèvement (S) % de e		2,5 à 5																							
		70 - 78				70 - 78				55 - 65				8 à 10				7 à 10							
		5 à 7				5 à 7				8 à 10				8 à 10				7 à 10							
		4 à 6				4 à 6				7 à 10				7 à 10				7 à 10							

T : temps de soudage en périodes  
 E : effort net sur la pointe d'électrode  
 I : intensité du courant d'effet Joule nécessaire  
 d : diamètre du noyau de point obtenu  
 R : résistance du point à l'effort de traction cisaillement

Pour les aciers ayant une teneur en carbone inférieure ou égale à 0,2 %, c'est-à-dire les aciers doux ou bas carbone, le soudage par résistance perturbe peu la métallurgie de ces matériaux. En revanche, pour les aciers ayant une teneur en carbone comprise entre 0,2 % et 0,3 %, comme les aciers de construction dits mi-durs, le soudage par résistance peut altérer la structure métallurgique et provoquer des concentrations de carbone, notamment lors de processus rapides. Ces perturbations métallurgiques peuvent être limitées par l'application de traitements thermiques appropriés sur les machines de soudage.

### Traitements thermiques

1. **Préchauffage** : En plus d'améliorer la ductilité, le préchauffage agit comme une réserve calorifique, ralentissant parfois le refroidissement et atténuant les effets de trempe.
2. **Post chauffage** : Après une trempe, un cycle de recuit est appliqué, en fonction de la montée de température, pour éviter des dégradations métallurgiques.

3. **Soudage des aciers à forte teneur en carbone**

Les aciers ayant une teneur en carbone supérieure à 0,3 %, appelés aciers naturellement durs, sont perturbés par le soudage par points. Les structures trempées ne peuvent pas être régénérées par traitement thermique sur machine, rendant ces aciers non soudables par ce procédé.

4. **Soudabilité des aciers faiblement alliés et des aciers inoxydables**

Les aciers faiblement alliés, dont la teneur en éléments d'alliage ne dépasse pas 5 %, peuvent être soudés avec ou sans traitement thermique, selon leur composition. En revanche, certains aciers inoxydables ou réfractaires peuvent nécessiter des précautions particulières, comme des traitements thermiques plus ou moins applicables.

#### I.5.1 Soudage des tôles revêtues

Revêtement les plus courant :

- Zinc : - Acier galvanisé chaude
- Acier électro-zingué à froid
- Étain : Fer blanc

- Aluminium : Tôle aluminée
- ZINC

Tôle galvanisé à chaud : procédé ZINZIMIR Trempage : charge en zinc au  $m^2$  (couche de liaison Fe /Zn)

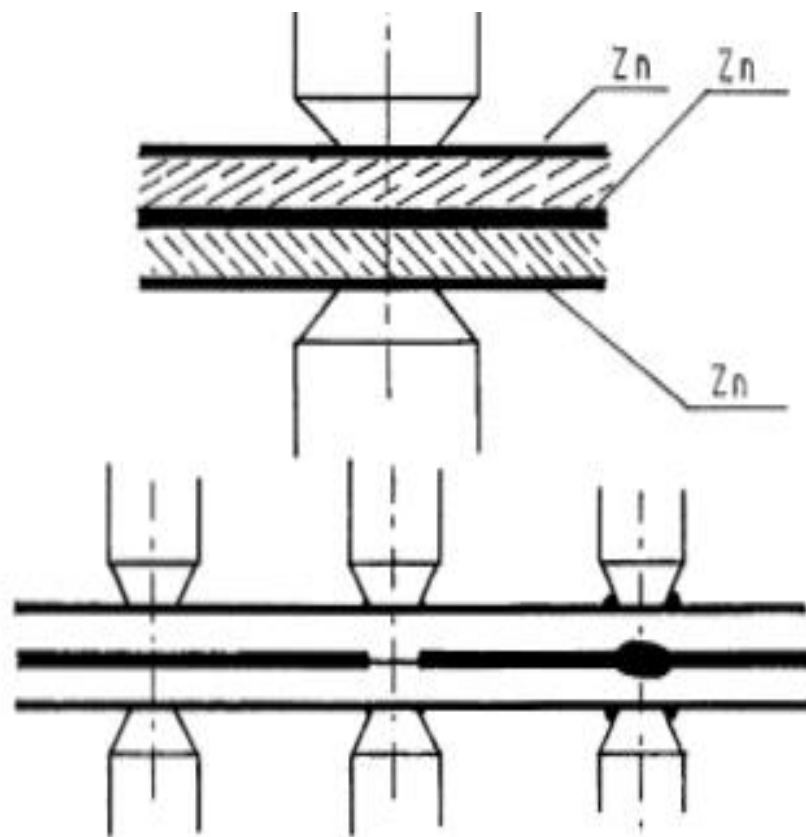
IDENTIFICATION :

Galvanisé à fleurage : 200 à 500  $g/m^2$

Galva skinpassé : 200 à 250  $g/m^2$

Galva régularité par soufflage : charge < 200  $g/m^2$

Soudage par point possible et préconisé en mode rapide pour fiabilité des points et durée de vie des électrodes



**Figure I.14 :** Soudage par point des tôles revêtues

La dégradation de la qualité du soudage diamètre de noyau par rapport à la pollution de l'électrode implique un soudage en mode rapide

Origine de la dégradation du soudage dans le temps :

- a) Régime thermique et cadence de soudage.
- b) Conception géométrique des électrodes.
- c) Nature du fluide de refroidissement utilisé.
- d) Débit du fluide de refroidissement.
- e) Température du fluide de refroidissement et de la pointe d'électrode.
- f) Nature de l'alliage utilisé pour la confection de pointes d'électrodes.
- g) Mises rapportées.

### I.5.2 Soudage des aciers inoxydables

- Structures ferritiques : Ces aciers, identifiables par leurs propriétés magnétiques, sont thermiquement fragiles et difficiles à souder.
- Structures austénitiques : Amagnétiques et très stables thermiquement, ces aciers inoxydables sont bien adaptés au soudage.
- Aciers réfractaires : Certains aciers réfractaires sont soudables sous certaines conditions, nécessitant des traitements thermiques spécifiques.

Consignes pour le soudage des aciers inoxydables

1. Polir la surface active des électrodes autant que possible.
2. Éviter l'arête vive de la section tronconique des électrodes, en arrondissant le rayon à 0,5 mm.
3. Pour des efforts supérieurs à 500 daN, il est conseillé d'utiliser des pointes d'électrodes en alliage cuivre-tungstène.
4. Pour des tôles d'une épaisseur de 3 mm et plus, le soudage par impulsions est recommandé.

**Tableau I.3:** Paramètre du soudage par points de l'acier inoxydable

$E_p$ (mm)	Ø Face active Electrode (mm)	Effort daN	Temps de soudage	Courant de Soudage (kA)	Ø du noyau (mm)	Temps de forgeage
0.5	3.2 à 4	180 à 230	2 à 3	4 à 5	3 à 4	8
0.6	4 à 4.2	190 à 240	4 à 5	4.5 à 5.2	3.5 à 4	10
0.8	4.5 à 4.8	250 à 300	5 à 6	5.5 à 6	4	10
1	5	300 à 400	7	6.8 à 7	4.8	16
1.2	5.4	450 à 500	8 à 9	8	5	20
1.5	6 à 6.2	500 à 600	10	9 à 10	6	22
1.8	6.7 à 6.9	850	11	12	7	24
2	7 à 7.2	900	12	14	8	25
2.4	7.2 à 7.5	1000	13	15	9	25
2.5	7.5 à 8	1200	14	16	6	30
3	9	1500	16	17.5 à 18	7	40

## I.6 Conclusion

Le soudage par points est un procédé de fabrication clé dans de nombreuses industries, permettant d'assembler des tôles métalliques de manière efficace et fiable. La réussite du soudage dépend directement de l'optimisation des paramètres de procédé, tels que l'effort de soudage, l'intensité du courant, et la gestion du temps de soudage et de maintien.

Les électrodes jouent un rôle crucial dans l'interface entre les tôles à souder et influencent la conductivité thermique, mécanique et électrique, ayant ainsi un impact direct sur la qualité du point de soudure. Par une gestion appropriée de ces paramètres, il est possible d'obtenir des soudures solides et durables, adaptées aux exigences de diverses applications industrielles. Une compréhension approfondie des principes et des variables du procédé permet ainsi de maximiser la performance du soudage par points et de garantir la qualité des assemblages.



## *Chapitre II*

### *Méthodes d'Essais Destructifs pour l'Évaluation des Matériaux*

## II. Introduction

Ce chapitre explore les principales méthodes d'essais destructifs utilisées pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux et évaluer la qualité des soudures par points. L'essai de traction permet de déterminer la résistance, la limite d'élasticité et la ductilité d'un matériau en le soumettant à une force croissante jusqu'à la rupture. Les essais de dureté (Brinell, Vickers, Rockwell) mesurent la résistance d'un matériau à la pénétration, fournissant des informations sur sa résistance à la déformation plastique. L'essai de résilience évalue l'énergie absorbée par un matériau lors d'une rupture par choc, indiquant sa ténacité. L'essai de fatigue examine le comportement d'un matériau sous des charges cycliques répétées, permettant de déterminer sa limite d'endurance.

Concernant les soudures par points, des essais spécifiques tels que l'essai de déboutonnage, l'essai de cisaillement par traction et par torsion, l'examen macrographique et l'essai de dureté Vickers à charge réduite sont utilisés pour évaluer leur résistance, leur intégrité et la qualité de la fusion.

L'ensemble de ces essais destructifs fournit des données essentielles pour la sélection des matériaux, le contrôle qualité et la prédiction du comportement des composants dans diverses applications d'ingénierie.

### II.1 Essai de traction

#### II.1.1 Principe

L'essai de traction consiste à appliquer une force croissante sur une éprouvette jusqu'à sa rupture, afin de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau. La déformation de l'éprouvette est généralement progressive, avec une vitesse de déformation constante. Durant l'essai, on enregistre simultanément la force appliquée  $F$  et l'allongement relatif  $\epsilon = \frac{L-L_0}{L_0}$ , où  $L_0$  est la longueur initiale de l'éprouvette et  $L$  la longueur après déformation. [11]

#### II.1.2 Éprouvette

L'éprouvette est habituellement obtenue par usinage à partir d'un prélèvement du matériau à tester ou d'une ébauche moulée. Les produits ayant une section constante, tels que des profilés, des barres ou des fils, ainsi que les éprouvettes brutes issues de la fonderie (fonte, alliages non ferreux, etc.), peuvent être soumis à l'essai sans nécessiter d'usinage préalable. Les dimensions et la forme des éprouvettes doivent répondre aux critères suivants :

Une éprouvette cylindrique

une éprouvette plate

$$l_0 = 5,65 \sqrt{S_0} \quad (\text{II. 1})$$

$$S_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} \text{ Avec } d \geq 4 \quad (\text{II. 2})$$

$$S_0 = a \times b \text{ avec } \frac{b}{a} \leq 8 \quad (\text{II. 3})$$

Où a est la longueur et b<sub>0</sub> la largeur de l'éprouvette. [12]



Figure II.1:Éprouvette

[12]

## II.1.3 Résultat de l'essai

### II.1.3.1 Courbe brute de traction

La courbe brute effort-déplacement (illustrée à la Figure II.2) représente le premier résultat d'un essai de traction. Cette courbe se divise généralement en plusieurs zones distinctes :

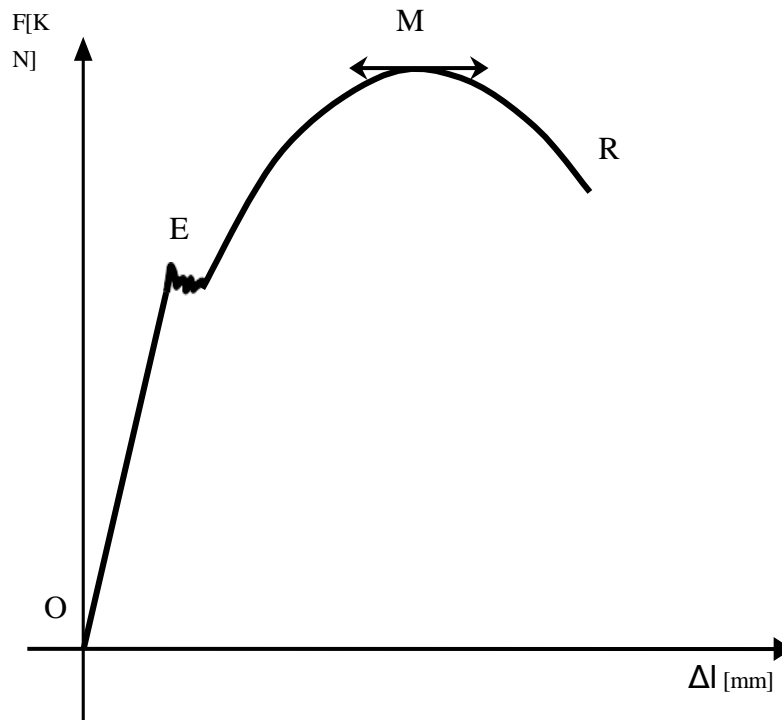


Figure II.2: Courbe brute de l'essai de traction

- **OE : Domaine linéaire ou domaine de proportionnalité**

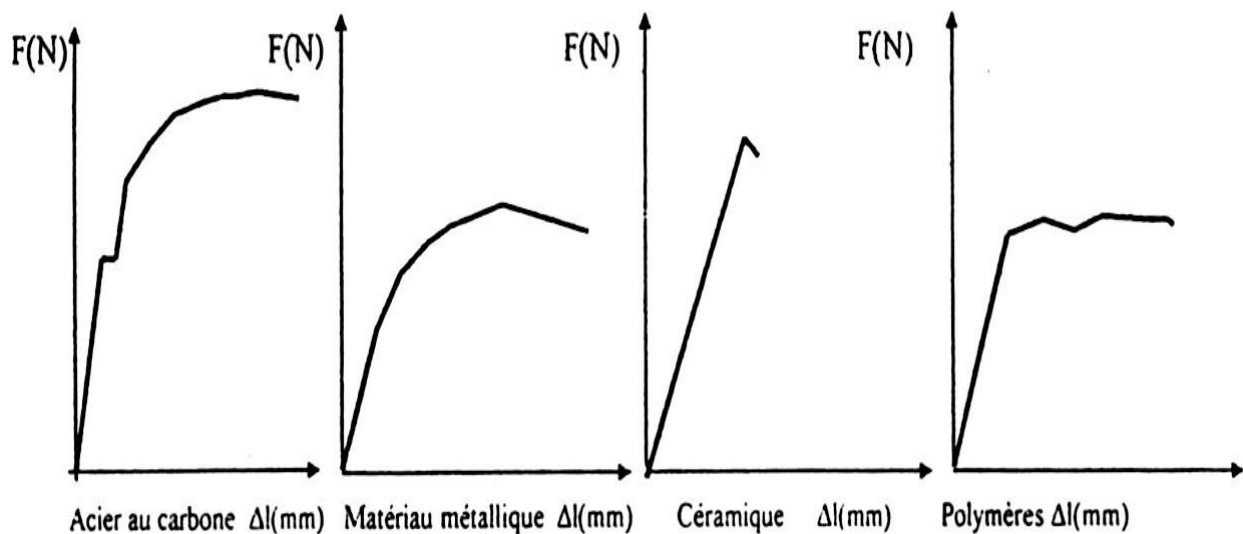
Dans cette zone, le matériau reste élastique, ce qui signifie que l'allongement est réversible. La relation entre l'effort et le déplacement est proportionnelle.

- **EMR : Domaine de plasticité ou d'irréversibilité**

Après le domaine élastique, le matériau entre dans une phase de déformation plastique. Dans cette zone, l'allongement devient irréversible.

Le point **M** représente l'effort maximal, correspondant au début de la striction (réduction de la section de l'éprouvette), tandis que le point **R** marque la rupture totale de l'éprouvette.

L'allure de cette courbe dépend fortement de plusieurs facteurs, notamment la géométrie de l'éprouvette, la nature du matériau testé (voir Figure II.3), ainsi que les conditions opératoires de l'essai. [13]



**Figure II.3:** Allure de la courbe brute en traction de la nature du matériau

### II.1.3.2 Courbe conventionnelle de traction

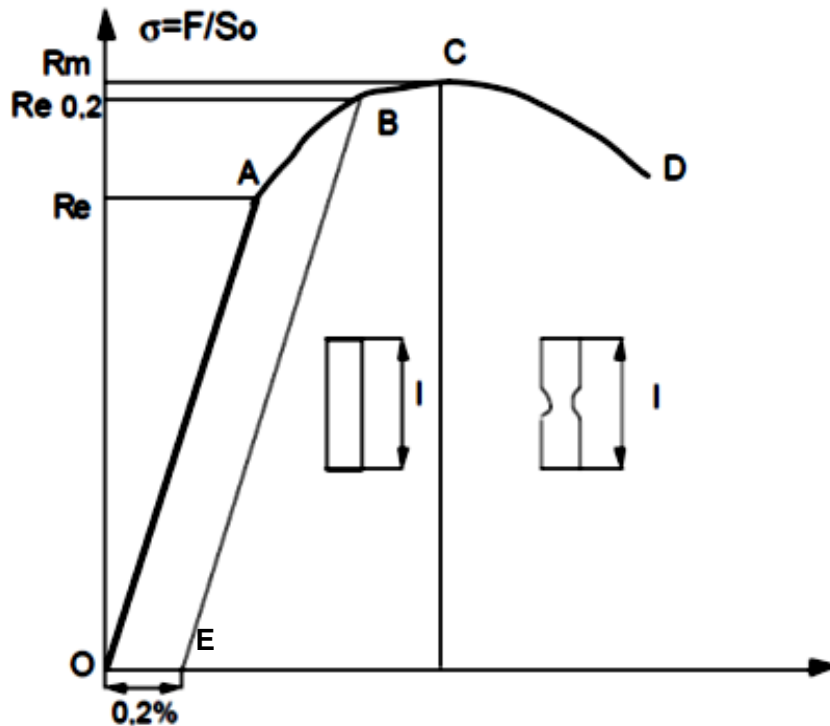
La courbe conventionnelle de traction est obtenue à partir de l'enregistrement de la force  $F$  en fonction de l'allongement  $\Delta L$  au cours de l'essai. Pour analyser le comportement du matériau indépendamment des dimensions de l'éprouvette, la force est rapportée à la section initiale  $S_0$ , permettant de définir la **contrainte** :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (\text{II. 4})$$

De même, l'allongement est rapporté à la longueur initiale  $L_0$  ce qui donne l'**allongement relatif** :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{II. 5})$$

Cette transformation permet d'obtenir une courbe intrinsèque au matériau (Figure II.4), indépendante de la taille ou de la géométrie de l'éprouvette utilisée.



**Figure II.4:** Allure courbe conventionnelle de traction

L'essai habituel, jusqu'à la rupture, est représenté par le chemin OACD sur la courbe. La zone OA correspond au domaine élastique : dans cette zone, si l'on réduit l'application de la charge à partir d'un point quelconque entre O et A, l'éprouvette revient à son état initial (point O) en suivant le même chemin. Si l'on diminue la charge à partir d'un point B, situé entre A et C, l'éprouvette revient à un point E en suivant un chemin parallèle à OA, ce qui entraîne une déformation rémanente OE.

Lorsque la charge est augmentée à partir du point E, l'éprouvette suit le chemin EB, ce qui correspond à une augmentation de la zone linéaire, un phénomène appelé écrouissage. Ce phénomène permet d'élargir artificiellement le domaine élastique du matériau.

En C : apparition de la striction, marquée par une réduction visible de la section

transversale de l'éprouvette.

En D : rupture totale de l'éprouvette.

L'écroutissage est particulièrement intéressant car il permet d'augmenter la capacité de déformation élastique d'un matériau, ce qui peut être utile dans certaines applications industrielles.

➤ Propriétés mécaniques extraites de la courbe conventionnelle de traction

À partir de cette courbe, plusieurs propriétés mécaniques importantes peuvent être extraites, telles que :

- La limite d'élasticité (contrainte pour laquelle la déformation devient irréversible).
- La contrainte maximale.
- L'allongement relatif à la rupture.
- La résistance à la rupture.

Limite élastique $R_e$ [MPa]	$R_e = \frac{F_e}{S_0}$ (II. 6)	Allongement pourcent $A(\%)$	$A(\%) = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$ (II. 9)
Résistance à la traction $R_m$ [MPa].	$R_m = \frac{F_m}{S_0}$ (II. 7)	Coefficient de striction $Z(\%)$	$z(\%) = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100$ (II. 10)
Module d'élasticité longitudinale $E$ [Mpa].	$E = \frac{F_e - l_0}{S_0 \Delta l}$ (II. 8)	Résistance pratique à l'extension $R_{pe}$ [Mpa].	$R_{pe} = \frac{R_e}{S}$ (II. 11)

Avec :  $l_u$  la Longueur ultime (longueur de l'éprouvette après rupture),  $S_u$  la Section ultime (Section de l'éprouvette après rupture) et  $s$  le coefficient de sécurité

Lorsque la limite d'élasticité  $R_e$  n'est pas clairement définie sur la courbe (Figure II.5), on utilise la limite conventionnelle d'élasticité  $R_{p0,2}$  qui correspond à une déformation plastique de 0,2 %.

Le coefficient de Poisson permet de caractériser la contraction du matériau perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué. Il peut être calculé à l'aide de la relation suivante :

$$v = \frac{(d_0 - d)}{d_0} \div \frac{(L - L_0)}{L_0} \quad (\text{II. 12})$$

Où :

$d_0$  et  $d$  sont respectivement le diamètre initial et le diamètre après déformation,

$L_0$  et  $L$  sont respectivement la longueur initiale et la longueur après déformation.

On peut également calculer la résilience du matériau, qui est sa capacité à absorber de l'énergie de manière élastique avant d'atteindre sa limite d'élasticité. Elle est définie par :

$$k = \frac{1}{2} \sigma_e \cdot \varepsilon_e = \frac{1}{2} E \cdot \varepsilon_e^2 = \frac{1}{2} \frac{\sigma_e^2}{E} \quad (\text{II. 13})$$

Où :

$\sigma_e$  : est la contrainte d'élasticité,

$\varepsilon_e$  : est la déformation élastique,

$E$  : est le module d'élasticité (module de Young)

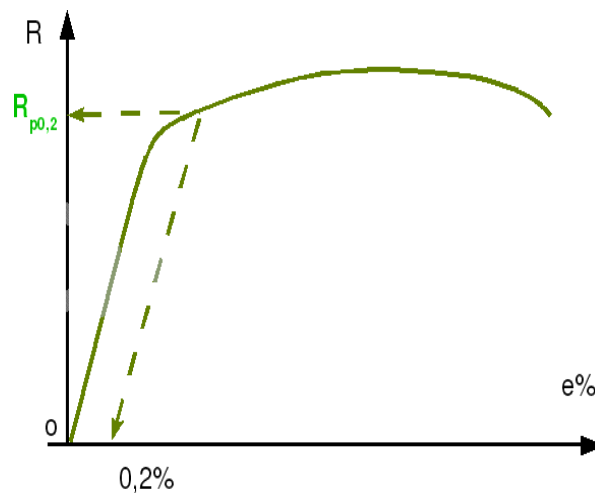


Figure II.5: Limite conventionnelle d'élasticité  $Re_{0,2}$

### II.1.3.3 Courbe rationnelle de traction

Dans la réalité, la section de l'éprouvette évolue continuellement au cours de l'essai et s'éloigne progressivement de sa valeur initiale. Il en va de même pour l'allongement relatif réel. Pour mieux représenter ces variations, on trace la courbe de traction vraie, ou courbe rationnelle, qui repose sur les sections et les déformations réelles à chaque instant. Cette courbe met en évidence le durcissement du matériau (écrouissage) au cours de la déformation plastique.

La courbe rationnelle de traction est tracée avec :

En ordonnée : la contrainte vraie  $\sigma_r$

En abscisse : la déformation vraie  $\varepsilon_r$ . [14]

### II.1.3.3.1 Relation entre $\sigma_r$ , $R$ et $e$

On admet, en première approximation, que la déformation plastique n'entraîne pas de variation de volume. Ainsi, on a la relation suivante :

$$S_0 L_0 = SL \quad (\text{II. 14})$$

D'où :

$$\frac{S_0}{S} = \frac{L}{L_0} = 1 + e \quad (\text{II. 15})$$

Sachant que la contrainte vraie est donnée par :

$$\sigma_r = \frac{F}{S} \quad (\text{II. 16})$$

On obtient la relation entre la contrainte vraie  $\sigma_r$  et la contrainte conventionnelle  $R$  :

$$\sigma_r = R(1 + e) \quad (\text{II. 17})$$

Avec :

$\sigma_r$  : Contrainte vraie (ou rationnelle),

$R$  : contrainte conventionnelle,

$E$  : déformation conventionnelle

### II.1.3.3.2 Relation $\varepsilon_r$ entre et $e$

L'incrément de déformation vraie s'écrit sous la forme :

$$d\varepsilon_r = \frac{dl}{l} \quad (\text{II. 18})$$

En intégrant cette expression entre la longueur initiale  $L_0$  et la longueur actuelle  $L$ , on obtient la déformation vraie :

$$\varepsilon_r = Ln \frac{l}{l_0} = \ln(1+e) \quad (\text{II. 19})$$

Avec :

$\varepsilon_r$  : déformation vraie (ou rationnelle),

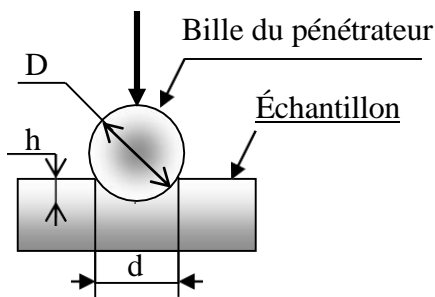
$e$  : déformation conventionnelle

## II.2 Essai de dureté

L'essai de dureté mesure la résistance d'un matériau à la pénétration d'un pénétrateur. Cette résistance dépend du comportement élastique et plastique du matériau ainsi que de la forme et de la charge appliquée par le pénétrateur.

### II.2.1 Essai de dureté Brinell

L'essai consiste à enfoncer dans la pièce à tester une bille de diamètre  $D$ , généralement en acier (**HBS**) ou en carbure de tungstène (**HBW**), sous une charge constante  $F$ . Après avoir retiré la charge, on mesure le diamètre  $d$  de l'empreinte laissée sur la surface du matériau. La dureté Brinell (**HB**) est un nombre proportionnel au rapport  $F/S$ , où  $S$  est la surface de l'empreinte, exprimée en  $\text{mm}^2$ . [15]



$D$  : diamètre de la bille (mm)

$d$  : diamètre de l'empreinte (mm).

$h$  : profondeur de l'empreinte (mm).

$F$  : charge de l'essai (daN).

L'empreinte de la bille produit sur le matériau une calotte sphérique de diamètre  $d$  qui sera mesuré

La dureté

$$HB = \frac{0,102 \times F}{S} \quad (\text{II. 20})$$

Avec

$$S = \frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \quad F = K \times 9.81 \times D^2 \quad (\text{II. 21})$$

Sachant que

$K = 30$  pour les aciers, bronzes, maillechorts;

$K = 10$  pour les laitons, alliages légers spéciaux;

$K = 5$  pour le cuivre, zinc, duralumin;

$K = 2$  pour l'étain, le plomb

$F$  : Charge en N (les charges utilisées en kgf sont 3000, 750 et 3)

$D$  : Diamètre de la bille en mm (les plus Utilisées: 10, 5 et 1mm)

$d$  : Diamètre de l'empreinte en mm

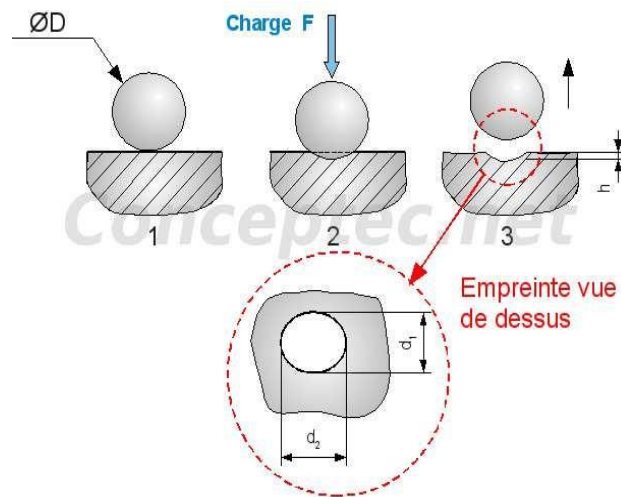


Figure II.6: Principe de l'essai de brinell

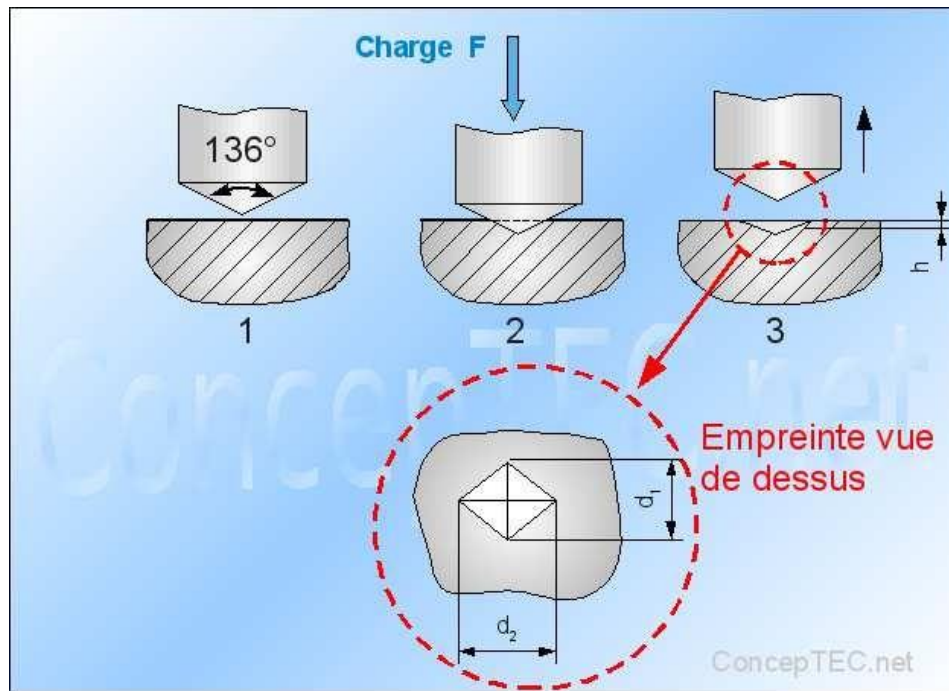
## II.2.2 Essai de dureté Vickers

Le pénétrateur utilisé dans cet essai est une pyramide droite à base carrée, avec un angle au sommet de  $136^\circ$ . Après avoir retiré la charge constante  $F$ , on mesure la diagonale  $d$  de l'empreinte (ou la moyenne des deux diagonales) à l'aide d'un microscope micrométrique.

### II.2.2.1 Méthode d'essai

- La charge normale d'essai est appliquée pendant 10 à 15 secondes.
- On peut utiliser l'une des charges suivantes : 4,8 – 9,8 – 19,6 – 49 – 78,4 – 98 daN.
- Pour des charges inférieures à 4,9 daN, on entre dans le domaine des microduretés.
- Des charges supérieures à 98 daN peuvent être utilisées avec une pyramide en acier trempé, notamment pour des matériaux de faible dureté.

$$HV = 0.189 \frac{F}{d^2} \text{ Avec } d = \frac{d_1 + d_2}{2} (F \text{ en daN, } d_1 \text{ et } d_2 \text{ en mm). \quad (II.22)$$



**Figure II.7:** Principe de l'essai de vickers

Cet essai est appliqué sur tout type de matériau et toute forme de pièce. Il couvre en effet les duretés les plus élevées et les épaisseurs les plus faibles. [16]

### II.2.3 Essai de dureté Rockwell

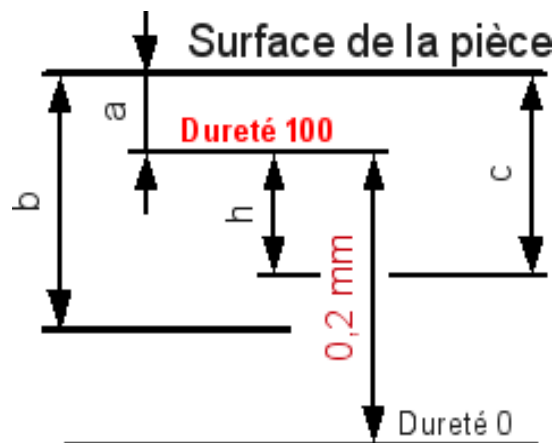
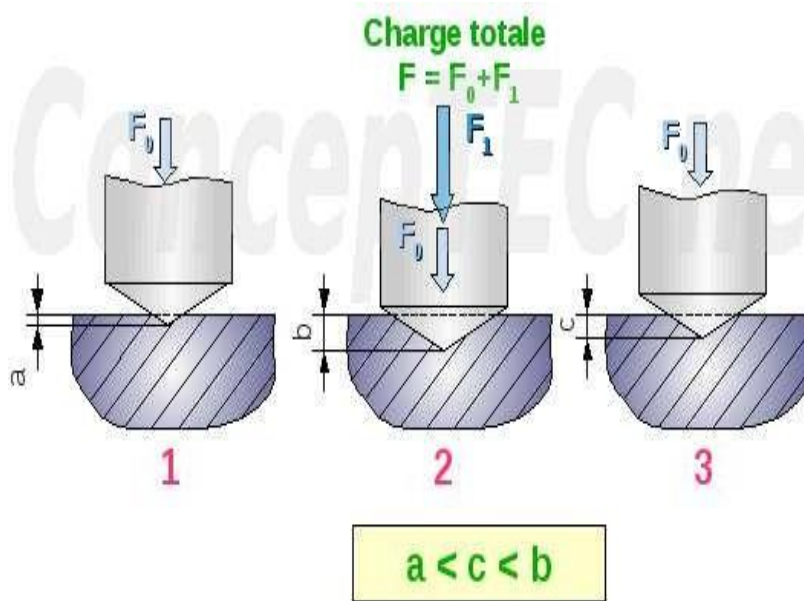
L'essai de dureté Rockwell consiste à mesurer la profondeur de pénétration laissée par un pénétrateur (de forme conique ou sphérique comme une bille) après l'application d'une charge et d'une surcharge successives dans la couche superficielle de la pièce. Cette mesure est réalisée à l'aide d'un comparateur fixé sur le pénétrateur.

Le déroulement de l'essai est le suivant :

- Charge initiale  $F_0$ : Le pénétrateur, perpendiculaire à la surface à tester, est soumis à une charge initiale généralement de 10 kgf, entraînant une pénétration  $a$ , qui sert d'origine pour la mesure de la profondeur.
- Ajout de surcharge  $F_1$ : Une surcharge est appliquée progressivement et sans chocs (généralement 50, 90 ou 140 kgf), entraînant un accroissement de la pénétration, qui atteint la valeur  $b$ .
- Retrait de la surcharge : La surcharge  $F_1$  est retirée pour revenir à la charge initiale

$F_0$  La pénétration décroît sous l'effet du retour élastique et se stabilise à une nouvelle valeur,  $c$ .

- Mesure de l'accroissement rémanent  $e$  : L'indicateur d'enfoncement, un comparateur de précision, mesure la différence entre la pénétration  $c$  sous  $F$  à la fin de l'essai et la pénétration  $a$  sous  $F_0$  au début de l'essai. Cette différence est l'accroissement rémanent  $e$ .



**Figure II.8:** Principe de l'essai Rockwell par cône

La dureté Rockwell est exprimée à partir de la profondeur de pénétration  $e$  (en mm) selon les formules suivantes :

- **Rockwell C (HRC) – Métaux durs (aciers trempés, résistance > 980 MPa)**

Charge appliquée :  $F_0=10$  daN et  $F_1=140$  daN

Formule :

$$HRC = 100(1 - 5e) \quad (\text{II. 23})$$

Indenteur utilisé : cône en acier trempé avec un angle au sommet de 120°, doté d'une pointe sphérique de rayon 0,2 mm.

Charge totale appliquée : **150 kgf** (10 + 140).

- **Rockwell B, E, F – Métaux tendres (aciers recuits, résistance entre 300 et 980 MPa)**

Charge appliquée :  $F_0=10$  daN et  $F_1=90$  daN

Formule :

$$HR (B, E, F) = 100(1.3 - 5e) \quad (\text{II. 24})$$

Indenteur utilisé : bille en acier trempé et poli

- **Diamètre de 1,587 mm** pour les essais **B et F**
- **Diamètre de 3,17 mm** pour l'essai **E**
- **Charge totale appliquée : 100 kgf** (10 + 90).

#### II.2.4 Recommandations pour le déroulement d'un essai de dureté

- **Préparation de la surface** : éviter toute altération en effectuant un polissage adapté (papier fin pour l'essai **Rockwell**, polissage micrographique à l'alumine pour l'essai **Vickers**).
- **Conditions de l'essai** : il doit être réalisé à **température ambiante**.
- **Application de la charge** : la charge doit être appliquée **progressivement**, sans à-coups, et maintenue à sa valeur finale pendant quelques instants (**10 à 15 s** pour l'essai **Brinell**).
- **Épaisseur minimale de la pièce** :

✚ **Brinell** : au moins 3 fois le diamètre de l'empreinte.

✚ **Rockwell** : au moins 8 fois l'accroissement  $e$ .

✚ **Vickers** : supérieure à 1,5 fois la diagonale de l'empreinte.

- **Support de la pièce** : il doit être rigide pour éviter toute déformation parasite.
- Nombre et répartition des essais :
  - ❖ Effectuer plusieurs mesures en différents points, espacés correctement :
    - ✚ **Brinell** : distance entre empreintes  $\geq 3$  fois le diamètre de la bille.
    - ✚ **Vickers** : distance entre centres d'empreintes  $\geq 2,5$  fois la diagonale.
- **Calcul du résultat** : la dureté est déterminée à partir de la moyenne des valeurs mesurées.

## II.3 Essai de résilience

### II.3.1 Principe

Cet essai vise à mesurer l'énergie nécessaire pour rompre en une seule fois une éprouvette préalablement entaillée. Le dispositif utilisé est un mouton-pendule, équipé à son extrémité d'un couteau permettant de libérer une énergie donnée au moment du choc. Selon la norme européenne, cette énergie est généralement de 300 joules.

### II.3.2 Éprouvette et essai

Les éprouvettes les plus utilisées sont (Figure II.9) :

- L'éprouvette ISO ayant une entaille en V de dimensions :

Profondeur : 2mm

Angle : 45°

Rayon en fond d'entaille : 0,25mm

- L'éprouvette ISO ayant une entaille en U de dimensions :

Profondeur : 5mm

Largeur : 2mm

Rayon en fond d'entaille : 1mm

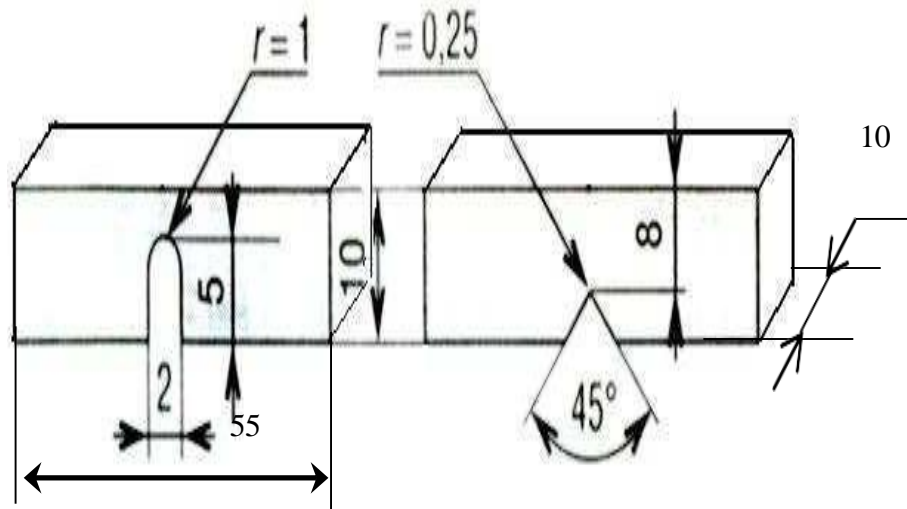


Figure II.9:Éprouvette de résilience  $\mu$

- Éprouvette en U
- Symbole  $K_{cu}$

- Éprouvette en V
- Symbole  $K_{cv}$

$$k = \frac{\text{energie absorbée } w}{\text{section au droit de l'entaille}}$$

### II.3.3 Dispositif expérimental

L'essai de résilience est réalisé à l'aide d'une machine appelée mouton-pendule de Charpy (Figure II.10), développée par Georges Charpy en 1901. Ce dispositif expérimental consiste en un pendule équipé, à son extrémité, d'un couteau de masse précisément déterminée. Lors de l'essai, le pendule est lâché depuis une position initiale correspondant généralement à une énergie potentielle  $W_0$  de **300 J**, permettant ainsi de briser l'éprouvette entaillée placée sur son support.

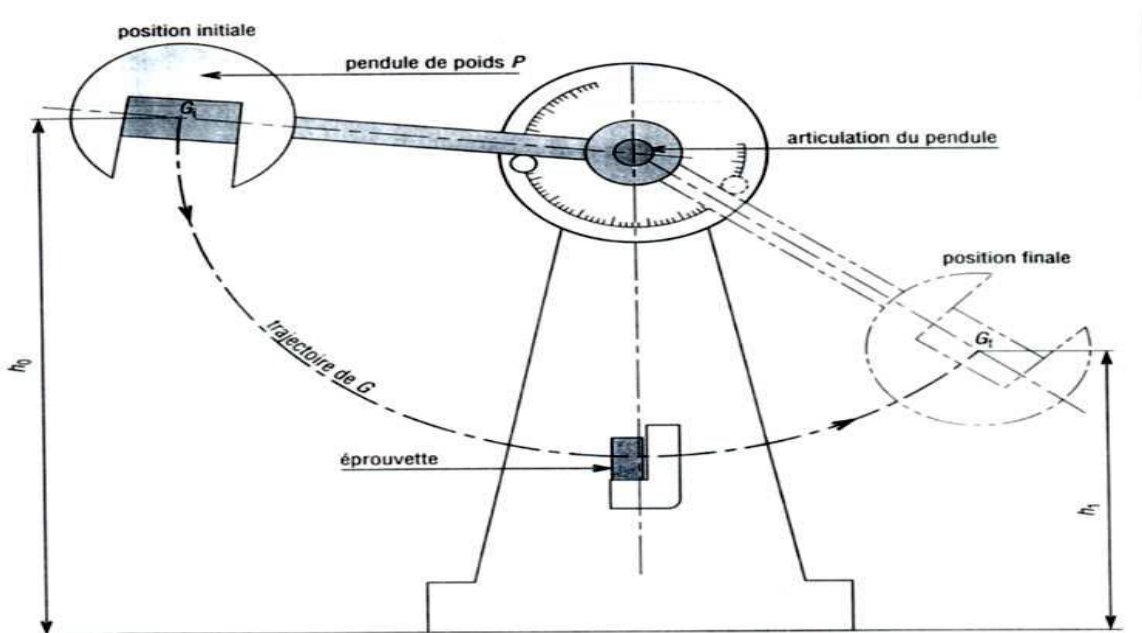


Figure II.10: Machine d'essai de résilience

L'essai, de nature comparative entre matériaux, permet de mesurer l'énergie nécessaire à un pendule pesant pour briser une éprouvette entaillée du matériau testé.

La résilience est définie comme l'énergie absorbée par l'éprouvette au moment de la rupture, rapportée généralement à la section brisée. Elle est notée  $K_{cv}$  ou  $K_C$  en  $J/cm^2$ , selon que l'entaille est de type *V* ou *U*, respectivement.

La résilience est calculée à partir de la différence d'énergie potentielle du pendule entre sa position initiale ( $W_0 = Mg \cdot h_0$ ) et sa position finale après impact ( $W_1 = Mg \cdot h_1$ ) :

$$K_{Cu}, K_{Cv} = \frac{M \cdot g \cdot (h_0 - h_1)}{S} \quad (\text{II. 25})$$

- $S$ : section rompue en  $cm^2$
- $M$  : en Kg.
- $h$ : en m
- $K_{cu}, K_{cv}$  : en  $J/cm^2$

En mesurant la résilience en fonction de la température, il est possible de tracer une courbe mettant en évidence une zone de transition ductile-fragile, qui correspond à un changement progressif du comportement du matériau, passant de ductile à fragile (voir Figure

II.11). Cette transition n'est généralement pas brutale, et des températures de transition arbitraires sont définies. Les plus couramment utilisées sont :

- **TK<sub>35</sub>** : température de transition correspondant à une résilience donnée, généralement fixée à 35 J/cm<sup>2</sup>.
- **TK<sub>50</sub>**: température de transition à laquelle 50 % de la rupture est de type ductile (ou cristallinité).

L'analyse des faciès de rupture à différentes températures permet d'observer les caractéristiques suivantes :

- **Dans la zone de rupture fragile**, où l'énergie absorbée est faible, le faciès présente un aspect "**à grains**" ou "**cristallin**" (surface brillante).
- **Dans la zone de rupture ductile**, où l'énergie absorbée est élevée, le faciès est marqué par la présence de "**nerfs**".
- **Dans la zone de transition ductile-fragile**, le faciès est **mixte**, combinant des caractéristiques des deux régimes précédents.

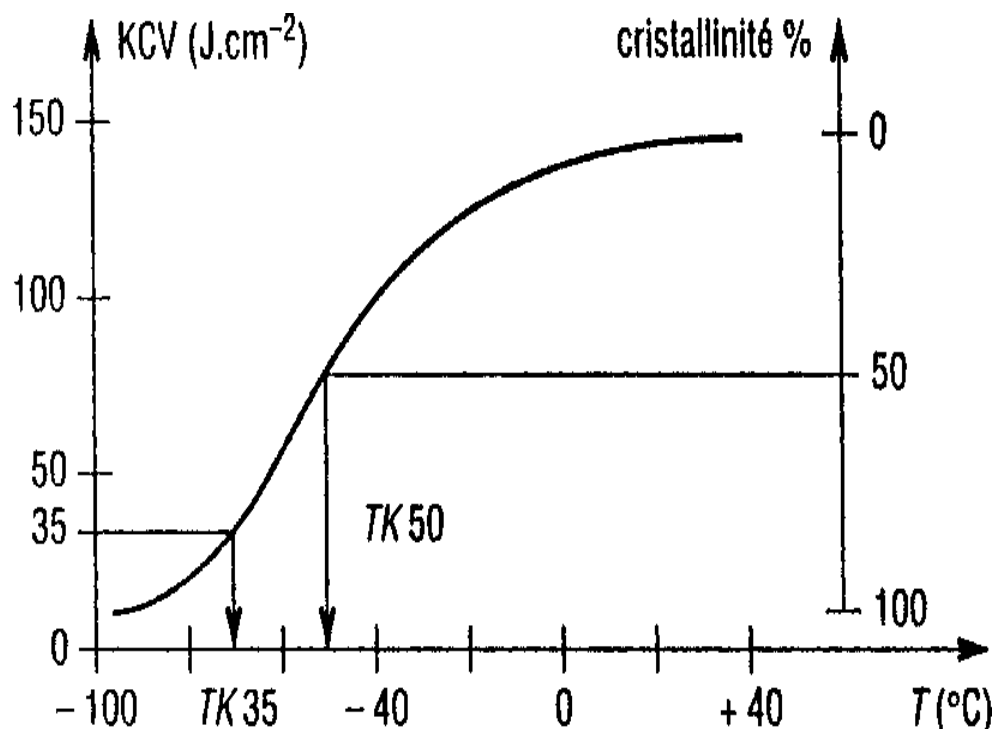
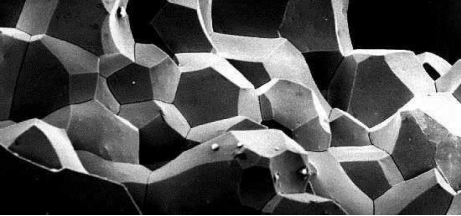
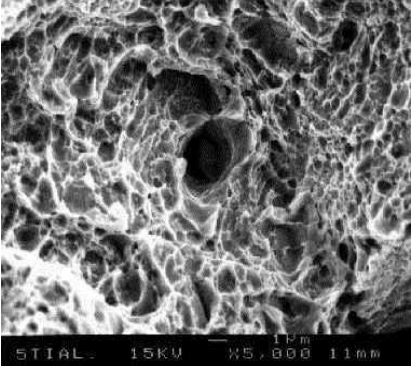




Figure II.11: Influence de la température sur la résilience

Photographie de rupture au MEB	
Rupture fragile cas d'un alliage Al-Mg-Zn fragilisé	Rupture ductile cas du cuivre
	

Fascié de rupture après essai de résilience	
Rupture fragile	Rupture ductile
	

## II.4 L'essai de fatigue

On définit la fatigue comme une sollicitation mécanique alternée, mais pas nécessairement périodique, et de faible amplitude. La fatigue est fréquemment responsable de la défaillance des pièces mécaniques en service, d'où l'importance de reproduire ce mode de sollicitation en laboratoire. Lorsqu'un matériau est soumis à des cycles répétés d'efforts, il subit des modifications de sa microstructure, regroupées sous le terme général d'endommagement par fatigue. Cet endommagement n'est pas immédiatement détectable de manière macroscopique, et la rupture peut survenir à des niveaux de contraintes relativement

faibles, souvent inférieurs à la résistance à la traction ou même à la limite d'élasticité. Le processus de fatigue implique l'apparition d'une fissure, qui se développe progressivement sous l'action des sollicitations répétées.

Les essais de fatigue les plus simples consistent à soumettre des séries d'éprouvettes (cylindriques ou rectangulaires) à des cycles d'efforts périodiques sinusoïdaux, soit par charge axiale, soit par flexion rotative. L'analyse des modes de rupture par fatigue a permis d'identifier trois phases essentielles qui se succèdent et conduisent finalement à la défaillance de la pièce :

Phase I : Initiation de la fissure

Phase II : Propagation dominante de la fissure

Phase III : Rupture finale

Les essais de fatigue caractérisent la capacité d'un matériau à résister à une sollicitation cyclique. Lorsque le nombre de cycles est faible, on parle de fatigue oligocyclique ou fatigue plastique. Lorsque ce nombre de cycles dépasse  $10^4$ , on parle alors de fatigue polycyclique.

#### II.4.1 Éprouvette

Les éprouvettes peuvent avoir diverses géométries. Traditionnellement, elles sont soit de section circulaire, soit parallélépipédique, avec une épaisseur constante ou variable, et peuvent être entaillées ou lisses. Les plus courantes sont les éprouvettes toroïdales, à section circulaire variable.

L'état de surface des éprouvettes doit être particulièrement soigné. Avant de procéder aux essais, il est essentiel de s'assurer de l'étalonnage dynamique des dispositifs de fatigue ainsi que de la coaxialité des têtes d'amarrage, afin de garantir une répartition homogène des contraintes dans les éprouvettes.



Figure II.12:Éprouvette toroïdale de fatigue

#### II.4.2 Chargement

Il est possible de soumettre les matériaux à différents types de sollicitations cycliques (voir Figure II.13). Celles-ci peuvent consister uniquement en alternance de traction, uniquement en alternance de compression, ou encore en une combinaison de traction et de compression. De plus, ces modes de sollicitations peuvent être associés à d'autres effets tels que la torsion ou la flexion

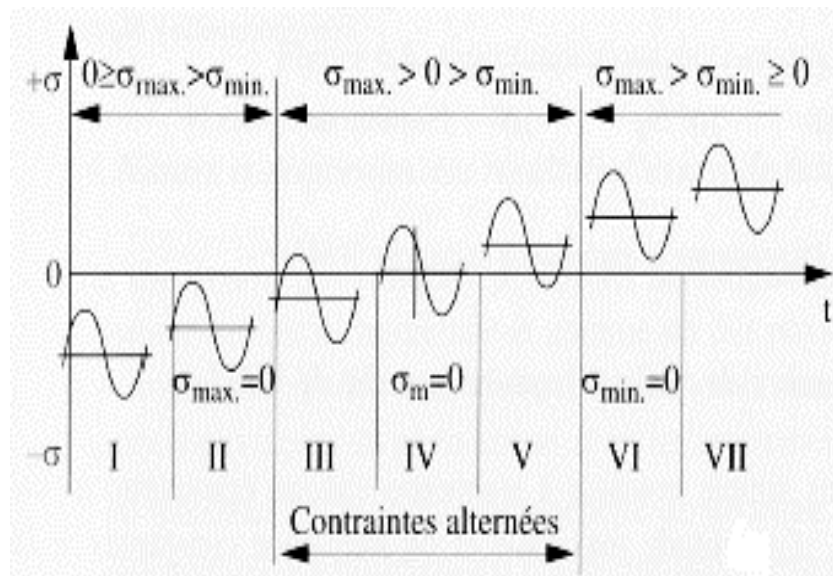


Figure II.13:Différents type de sollicitation appliqué en fatigue

Une sollicitation cyclique est caractérisée par les grandeurs suivantes (Figure 20) :

- $\sigma_{max}$ : Contrainte maximale au cours du cycle

- $\sigma_{min}$ : Contrainte minimale au cours du cycle
- $\sigma_m$ : Contrainte moyenne au cours de cycle égal à  $\frac{1}{2}(\sigma_{max} + \sigma_{min})$
- $\sigma_a$ : Amplitude des contraintes égal à  $\frac{1}{2}(\sigma_{max} - \sigma_{min})$
- $\Delta\sigma$ : Écart des contraintes égal à  $(\sigma_{max} - \sigma_{min}) = 2\sigma_a$
- $R$ : Rapport de chargement égal à  $\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

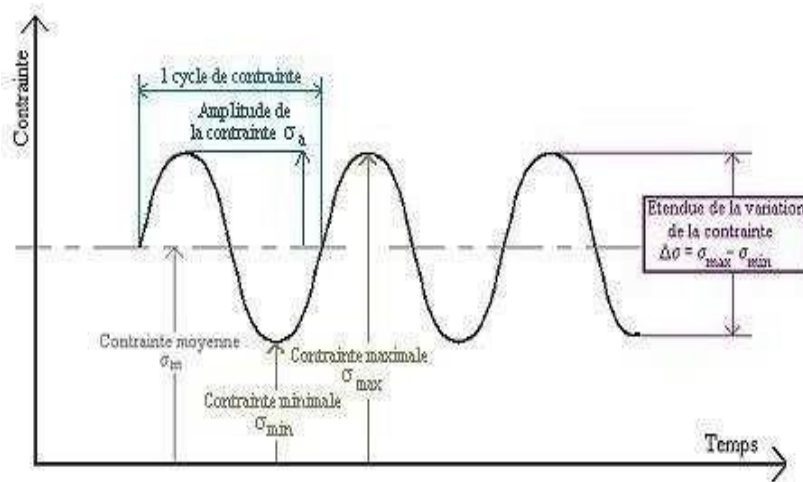


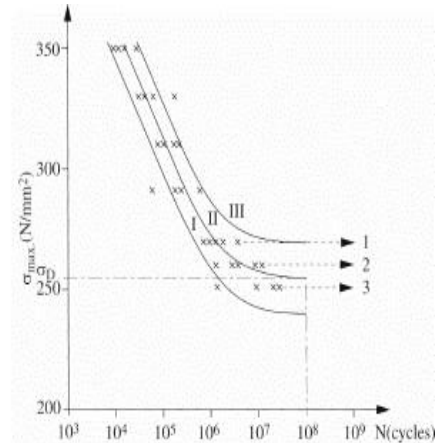
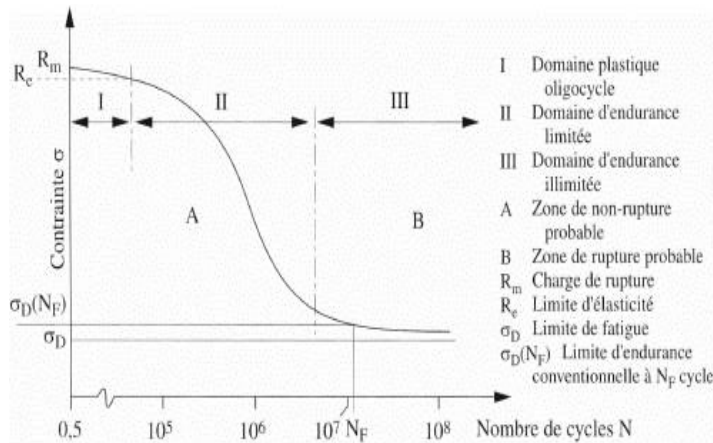
Figure II.14: Caractéristique d'une sollicitation cyclique

## II.4.3 Résultats

### II.4.3.1 Courbe de Wöhler

Les essais de fatigue permettent de déterminer le nombre de cycles à rupture pour une sollicitation donnée. Ces résultats sont généralement présentés sous la forme d'une courbe semi logarithmique, appelée courbe de Wöhler (ou courbe S-N, pour Stress et Number of cycles to failure, en anglais). Une courbe typique est illustrée à (la Figure II.15 et II.16). On y distingue trois zones principales :

- **Fatigue oligocyclique** : Sous une contrainte élevée, la rupture survient après un très petit nombre de cycles et est précédée d'une forte déformation plastique.
- **Zone d'endurance limitée ou de fatigue** : La rupture se produit après un nombre limité de cycles, un nombre qui augmente à mesure que la contrainte diminue.
- **Zone d'endurance illimitée ou de sécurité** : Sous une faible contrainte, la rupture intervient après un nombre très élevé de cycles, supérieur à la durée de vie de la pièce.



**Figure II.15:**Schéma idéal d'une courbe de Wöhler

**Figure II.16:**Dispersion des résultats des mesures de fatigue

Le comportement à la fatigue des composants, qui subissent d'abord une phase d'initiation puis une phase de propagation de fissure, est fréquemment représenté sous forme de courbes S-N. Dans ce type de représentation, la durée de vie en cycles (Nf) est exprimée en fonction de la contrainte appliquée. La durée de vie varie de manière inverse à la contrainte appliquée. Pour les alliages à base de fer ou de titane, ces courbes présentent une contrainte limite en dessous de laquelle aucune rupture ne se produit. Cette contrainte est appelée limite de fatigue ou limite d'endurance. Le point de rupture, marqué par une pente de la courbe, se situe généralement entre 10<sup>5</sup> et 10<sup>7</sup> cycles. En revanche, pour les alliages d'aluminium et autres métaux non-ferreux, les courbes ne montrent pas de contrainte asymptotique ; ainsi, une durée de vie finie correspond à chaque niveau de contrainte. Toutefois, pour tous les matériaux, la partie des courbes correspondant aux grands nombres de cycles devient relativement plate (environ après 10<sup>5</sup> cycles).

### II.4.3.2 Dispersion des résultats

Les essais de fatigue présentent une dispersion importante (Figure II.16, courbe de droite), ce qui signifie qu'il y a rupture, pour un même niveau de charge, à un nombre de cycles variable d'une éprouvette à l'autre. Cette variabilité est due à plusieurs facteurs :

- Le matériau (inclusions, hétérogénéités de structure...)
- Les éprouvettes (état de surface variable, tolérances dimensionnelles...)

- Les conditions d'essai (centrage des éprouvettes, fréquence des cycles, effets d'environnement...)

Ainsi, pour un nombre de cycles donné, il est possible de déterminer la probabilité de rupture en fonction de la contrainte. Ces courbes sont généralement des sigmoïdes normales. Dans ce contexte, l'analyse statistique de la fatigue permet d'estimer les paramètres de la courbe de réponse :

- $\mu$ , l'amplitude de la contrainte pour laquelle la probabilité de rupture est de 0,5
- $\sigma$ , l'écart-type de la dispersion de la contrainte

En déterminant ces courbes pour différents nombres de cycles, il est possible de tracer la courbe d'équiprobabilité de rupture en fonction du nombre de cycles. En général, chaque courbe d'équiprobabilité de rupture possède une asymptote. En particulier, la courbe d'équiprobabilité 0,5 tend vers la limite d'endurance  $\sigma_\infty$ . Bien que cette limite soit théoriquement inaccessible, elle est remplacée en pratique par une limite d'endurance conventionnelle pour un nombre de cycles donné (par exemple,  $10^7$ ,  $10^8$ , etc.). À cette valeur est associé un écart-type  $\sigma$  de la zone d'endurance, représentant l'écart-type de la courbe de réponse en contrainte

## II.5 Quelques types d'essais destructifs appliqués aux soudures par points

Dans cette section, nous présentons un aperçu de quelques essais destructifs couramment utilisés pour évaluer les performances des soudures par points

### II.5.1 Essai de déboutonnage

L'essai de déboutonnage consiste à séparer les deux pièces soudées par recouvrement, en appliquant un effort à l'aide d'un marteau ou d'un dispositif mécanique, tel qu'une presse hydraulique. Cet essai permet de juger la qualité du point de soudure en observant le diamètre de la zone rompue, la section effectivement soudée et la résistance de l'assemblage. Il est généralement pratiqué sur des pièces d'épaisseur comprise entre 0,5 et 2 mm. Simple, rapide et facilement réalisable, cet essai est souvent utilisé par les opérateurs pour ajuster les paramètres d'une machine de soudage.[18]

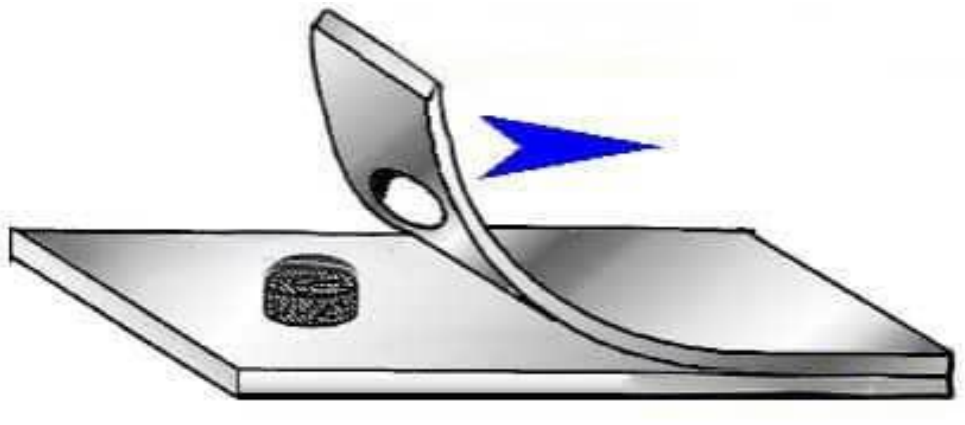


Figure II.17:Essai de déboutonnage

### II.5.2 Essai de cisaillement par traction du point soudé

Cet essai consiste à exercer une traction sur les deux pièces assemblées par points jusqu'à la rupture de la soudure, à l'aide d'une machine de traction. La force appliquée permet de mesurer l'effort nécessaire pour rompre le point de soudure. La rupture peut survenir soit à l'interface entre les tôles, soit par un phénomène de déboutonnage, en fonction de la qualité de la soudure. Ce test est essentiel pour évaluer la résistance mécanique de l'assemblage dans des conditions de sollicitation en traction. [18]

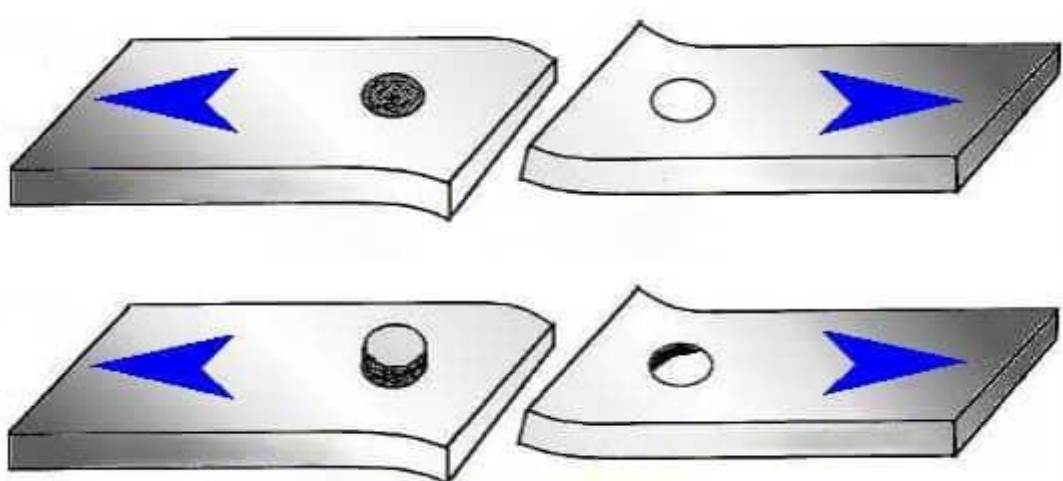


Figure II.18:Essai de cisaillement par traction du point soudé

### II.5.3 Essai de cisaillement par torsion du point soudé

Dans cet essai, la rupture du point de soudure est provoquée par l'application d'un couple de torsion. Pour ce faire, deux trous sont percés de part et d'autre d'une diagonale traversant le centre du point soudé. Une force est ensuite appliquée sur l'une des plaques, ce

qui engendre une contrainte de torsion jusqu'à la rupture. Ce test permet d'évaluer la résistance de la soudure face à des sollicitations de type rotatif ou de cisaillement en torsion.

[18]

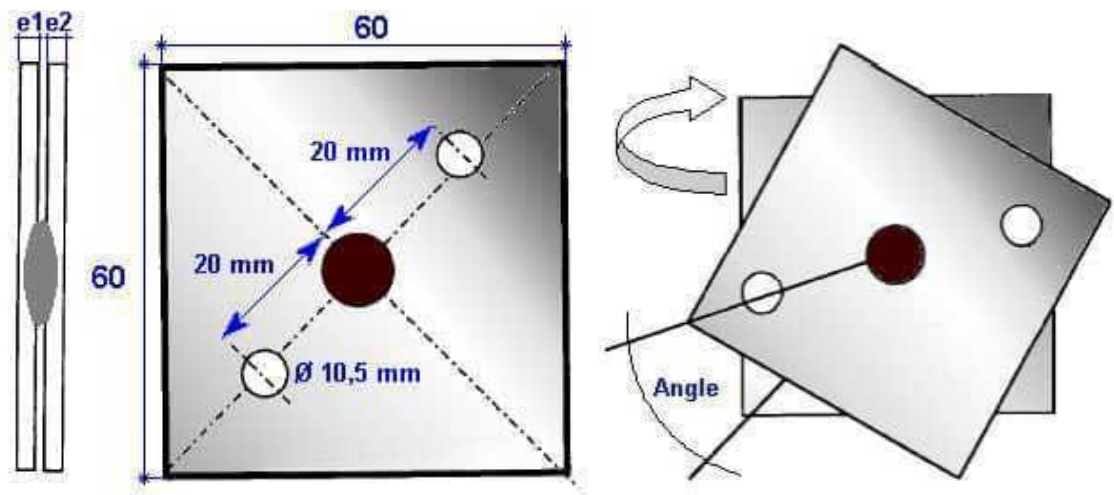


Figure II.19: Essai de cisaillement par torsion du point soudé

#### II.5.4 Examen macrographique du point soudé

L'analyse macrographique consiste à découper une section du point de soudure et à en polir la surface avant de l'attaquer avec un réactif chimique. Cette attaque révèle la structure métallographique de la soudure, de la zone affectée thermiquement (ZAT) et du métal de base. L'objectif est de vérifier la compacité de la soudure, la bonne fusion entre les matériaux et l'absence de défauts tels que porosités, inclusions ou fissures. Cette méthode fournit une vision claire des hétérogénéités physiques et chimiques présentes dans la zone soudée. [18]

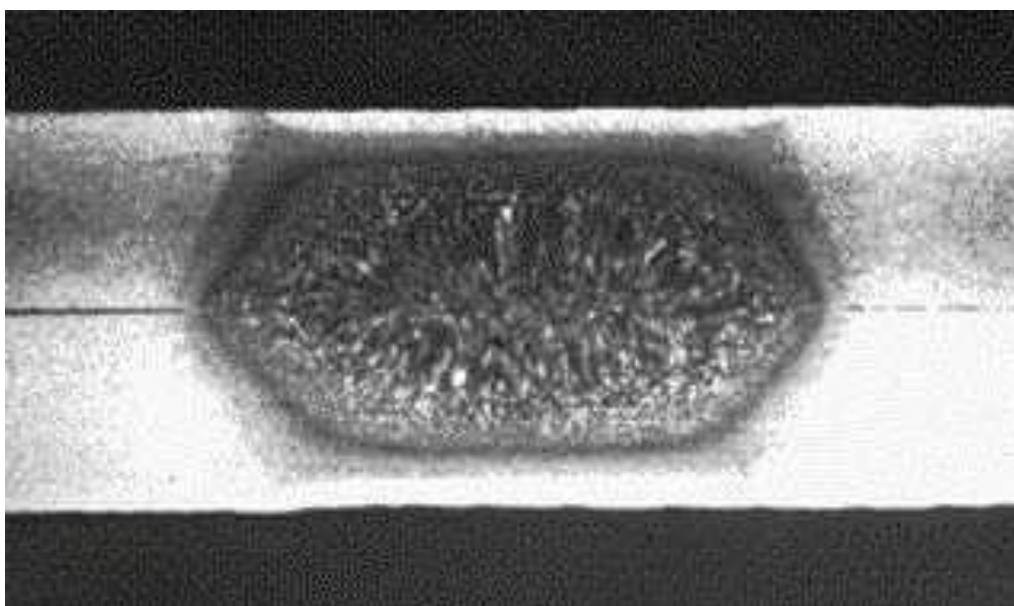
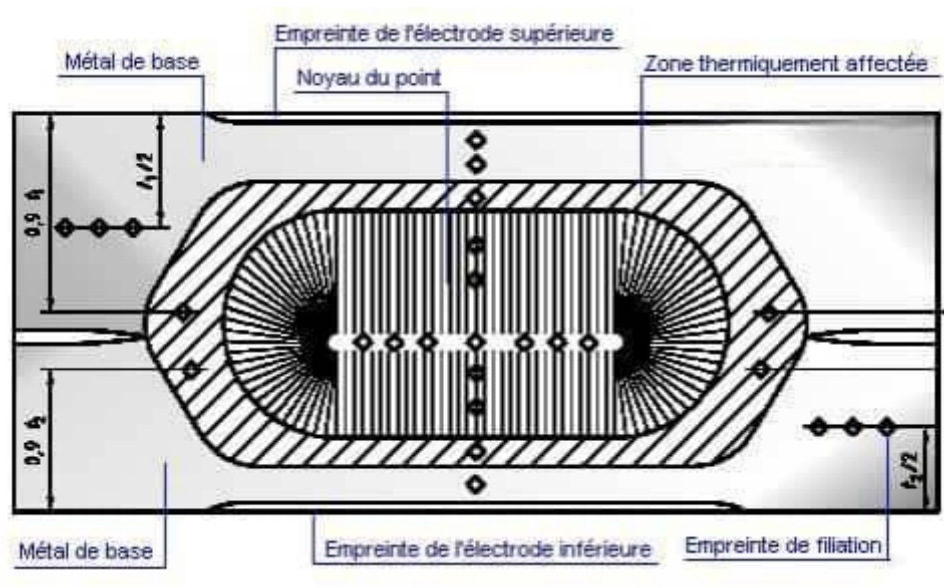


Figure II.20 : Micrographie du point soudé

### II.5.5 Essai de dureté Vickers à charge réduite



**Figure II.21:**Essai de dureté

Cet essai vise à mesurer la dureté de la soudure, de la zone affectée thermiquement ainsi que du métal de base. Il est particulièrement adapté aux matériaux susceptibles de subir des transformations structurales (trempe ou durcissement). La charge appliquée varie de 1,9 N à 9,8 N (correspondant à HV 0,2 à HV 1), ce qui permet une mesure précise sans détériorer les zones avoisinantes. Réalisé sur une coupe macrographique, cet essai met en évidence les variations de dureté à travers les différentes zones de l'éprouvette, fournissant ainsi des informations précieuses sur l'effet de la soudure et du traitement thermique. [18]

## II.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté les principaux essais destructifs utilisés pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux (traction, dureté, résilience, fatigue) et évaluer la qualité des soudures par points (déboutonnage, cisaillement, examen macrographique). Chaque essai fournit des informations cruciales sur le comportement des matériaux face à différentes sollicitations. Le choix de l'essai dépend des propriétés à évaluer et de l'application. Les données obtenues sont essentielles pour la conception, la sélection des matériaux, le contrôle qualité et la garantie de la sécurité et de la performance des applications techniques.



## *Chapitre III*

# *Modélisation et Simulation sous ABAQUS*

### III. Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation numérique du comportement mécanique de joints soudés par point, réalisés avec deux types de matériaux : l'acier DC03 (acier doux formable à froid) et le cuivre. Ces assemblages sont soumis à un chargement uniaxial en traction, afin de comparer leur réponse mécanique.

L'objectif principal de cette simulation est d'évaluer les performances de chaque matériau dans un assemblage soudé à clin, en analysant les contraintes, les déformations et la distribution des efforts internes. Pour cela, le logiciel ABAQUS, reconnu pour sa robustesse dans les analyses par éléments finis, est utilisé. Après une présentation générale du logiciel et des outils de simulation disponibles, les différentes étapes de la modélisation sont détaillées : création de la géométrie, définition des matériaux, mise en place des conditions limites, maillage, et lancement des calculs.

Cette démarche permet d'aboutir à une représentation numérique réaliste du comportement des joints soudés, en vue d'une analyse détaillée dans le chapitre suivant.

#### III.1 Présentation du code de calcul par éléments finis ABAQUS

Fondé en 1978, ABAQUS est l'un des leaders mondiaux dans la fourniture de logiciels et de services pour l'analyse par éléments finis. Réputée pour sa technologie avancée, sa fiabilité et sa qualité, la gamme de logiciels ABAQUS est devenue un outil essentiel dans les processus de conception de nombreuses entreprises de premier plan à l'échelle mondiale, dans de nombreux secteurs industriels.

ABAQUS offre des solutions performantes pour résoudre des problèmes linéaires, non linéaires, dynamiques et explicites. Il fournit un environnement unique pour l'analyse par éléments finis, avec une large variété d'options adaptées à des opérations impliquant plusieurs fournisseurs et produits.[19]

#### III.2 Logiciels sur le marché

Il existe une large variété de logiciels de conception et de calculs assistés par ordinateur disponibles sur le marché. Parmi les plus utilisés, on retrouve NASTRAN, CATIA, ABAQUS et SolidWorks. Ces logiciels remplissent des fonctions similaires : ils permettent de modéliser les caractéristiques d'une structure et effectuent des calculs sur celle-ci (déformations, ruptures, plastification, etc.). Enfin, ils permettent de traiter et d'exploiter

les résultats obtenus pour en extraire des données utiles.

Dans la pratique, la plupart des entreprises combinent l'utilisation de ces logiciels, chacun étant plus performant dans certaines tâches spécifiques. Par exemple, CATIA est souvent utilisé pour la conception, ABAQUS pour les calculs, et NASTRAN pour le post-traitement des résultats. Il est donc fort probable qu'en entreprise, vous soyez amené à travailler avec ces outils dans des configurations variées.. [20]

### III.3 Deux solveurs principaux

Le programme d'analyse par éléments finis que nous utilisons dans l'espace FEA (Analyse par éléments finis) est ABAQUS/CAE, une interface utilisateur cohérente et uniforme pour l'ensemble du système. ABAQUS est une suite complète de modules dédiée à l'analyse par éléments finis. Les modules principaux, ABAQUS/Standard et ABAQUS/Explicit, constituent le cœur des outils d'analyse, complémentaires et intégrés.

#### III.3.1 ABAQUS/Standard

Algorithme implicite :

- ✓ Code général d'analyse par éléments finis : permet la discrétisation spatiale des structures.
- ✓ Méthodes de résolution : basées sur l'algorithme de Newton-Raphson et la méthode de Riks.

Caractéristiques :

- ✓ Adapté aux problèmes linéaires et non linéaires.
- ✓ Prise en charge de géométries 1D, 2D, 3D et axisymétriques.
- ✓ Offre de nombreuses procédures d'analyse, tant dans le domaine temporel que fréquentiel.

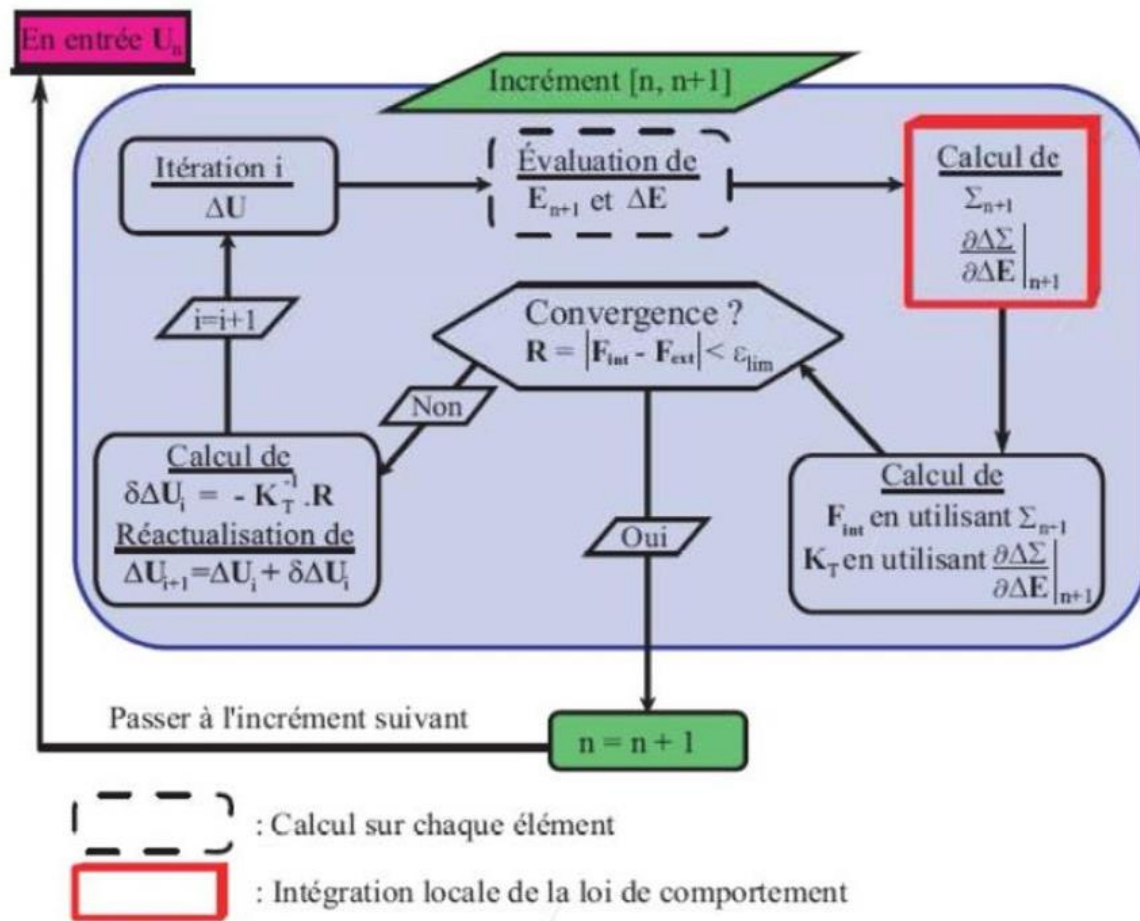


Figure III.1: Organigramme de résolution de schéma implicite. [21][22]

### III.3.2 ABAQUS/Explicit : Algorithme "Dynamique" Explicite

- ✓ Analyse non linéaire : implique à la fois la discrétisation spatiale et temporelle.
- ✓ Problèmes transitoires et dynamiques des structures : spécialement conçu pour les phénomènes de courte durée.
- ✓ Méthode de résolution : utilise une intégration explicite en temps pour la simulation. Bien que principalement utilisé pour les analyses dynamiques, ABAQUS/Explicit permet également des analyses quasi-statiques, où des comportements non linéaires importants peuvent être observés. (Figure III.2)

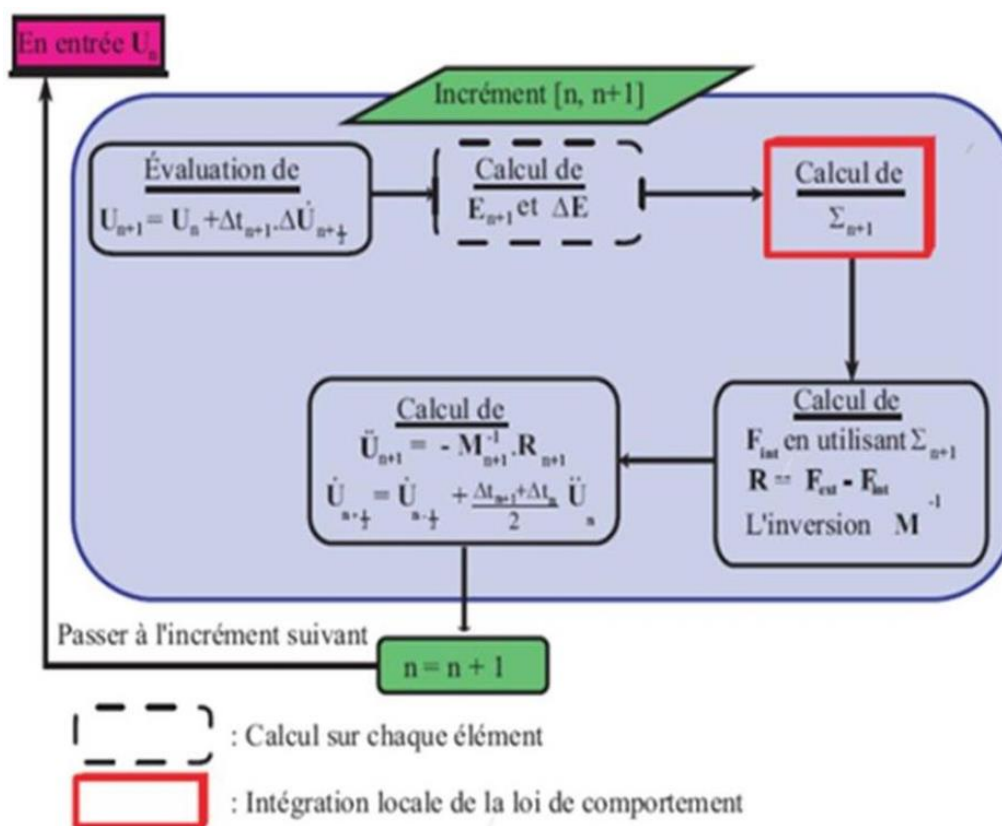


Figure III.2: Organigramme de résolution de schéma explicite. [19][21]

Le tableau III.1 présente une comparaison entre les deux méthodes :

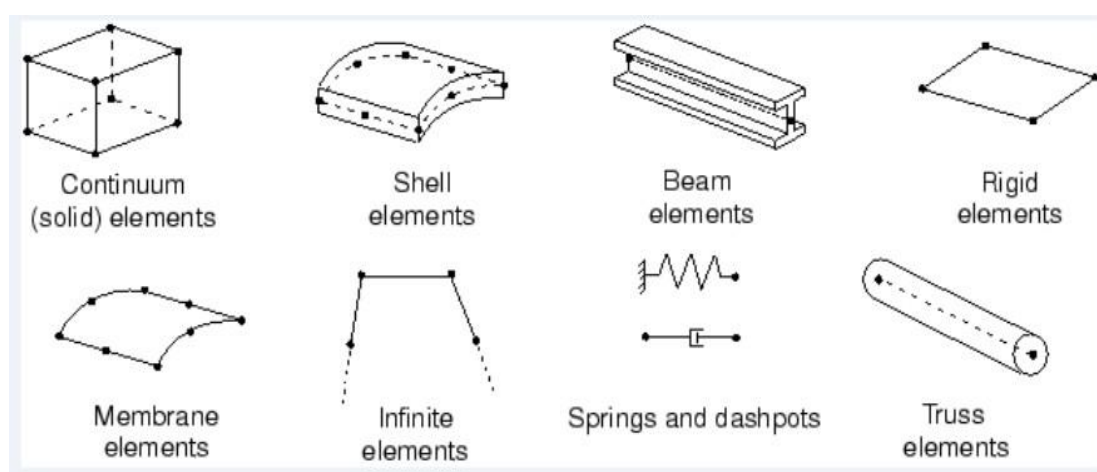
Tableau III.1: Inconvénients et avantages du module implicite et explicite [21][22]

Explicite	Implicite
Conditionnellement stable	Inconditionnellement stable
Pas de temps réduit	Pas de temps géré par l'utilisateur
Précision en $\Delta t^2$	Précision en $\Delta t^2$
Inversion de $[M]$ , diagonal	Inversion de $[M] + \alpha [K]$ , non diagonale
Taille mémoire réduite	Taille mémoire importante
Résolution élément par élément	Résolution globale, nécessite la convergence à chaque itération
Robuste	Pivots nuls, divergence
Faible coût CPU	coût CPU important

### III.4 Présentation des différents types d'éléments ABAQUS

Le logiciel de calcul ABAQUS propose une large gamme d'éléments, chacun ayant des caractéristiques spécifiques en termes d'interpolation, de symétrie et de propriétés physiques. Ces éléments varient en fonction de la dimensionnalité : 3D, 2D, 1D linéaire, ainsi que des éléments connecteurs.

Le choix entre ces différents types d'éléments dépend de la compréhension du problème à simuler. En effet, il permet de prendre en compte des facteurs tels que les symétries géométriques, les conditions de chargement, les conditions aux limites et les propriétés des matériaux.[23]



**Figure III.3:** Différents types d'éléments disponibles dans la bibliothèque d'ABAQUS [22]

### III.5 Systèmes d'unités dans le logiciel ABAQUS

Avant de définir un modèle, il est essentiel de choisir le système d'unités que vous allez utiliser. ABAQUS ne propose pas de système d'unités intégré. Ainsi, toutes les données d'entrée doivent être spécifiées en unités cohérentes. Les résultats générés suivent le système d'unités basé sur le SI (système international), avec des valeurs généralement exprimées en millimètres (mm). Voir le Tableau III.2 pour plus de détails. [19]

### III.6 Structure d'une analyse sous ABAQUS

ABAQUS n'est qu'un solveur (implicite ou explicite), comme illustré dans la Figure III.4 Il résout un problème qui lui est décrit à travers un fichier d'entrée (ou fichier de données) et enregistre la solution dans un fichier de sortie (ou fichier de résultats)

Tableau III.2: Les unités dans ABAQUS. [24]

Quantité	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Longueur	<i>m</i>	<i>mm</i>	<i>Ft</i>	<i>in</i>
Force	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>Ibf</i>	<i>Ibf</i>
Masse	<i>Kg</i>	<i>Tonne (10<sup>3</sup> Kg)</i>	<i>slug</i>	<i>Ibf s<sup>2</sup>/in</i>
Temps	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>S</i>	<i>s</i>
Contrainte	<i>Pa (N/m<sup>2</sup>)</i>	<i>MPa (N/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>Ibf/ft<sup>2</sup></i>	<i>Psi (Ibf/in<sup>2</sup>)</i>
Énergie	<i>j</i>	<i>mJ (10<sup>-3</sup> J)</i>	<i>ft Ibf</i>	<i>In Ibf</i>
Masse volumique	<i>Kg/m<sup>3</sup></i>	<i>Tonne / mm<sup>3</sup></i>	<i>Slug /ft<sup>3</sup></i>	<i>Ibf s<sup>2</sup>/in<sup>3</sup></i>

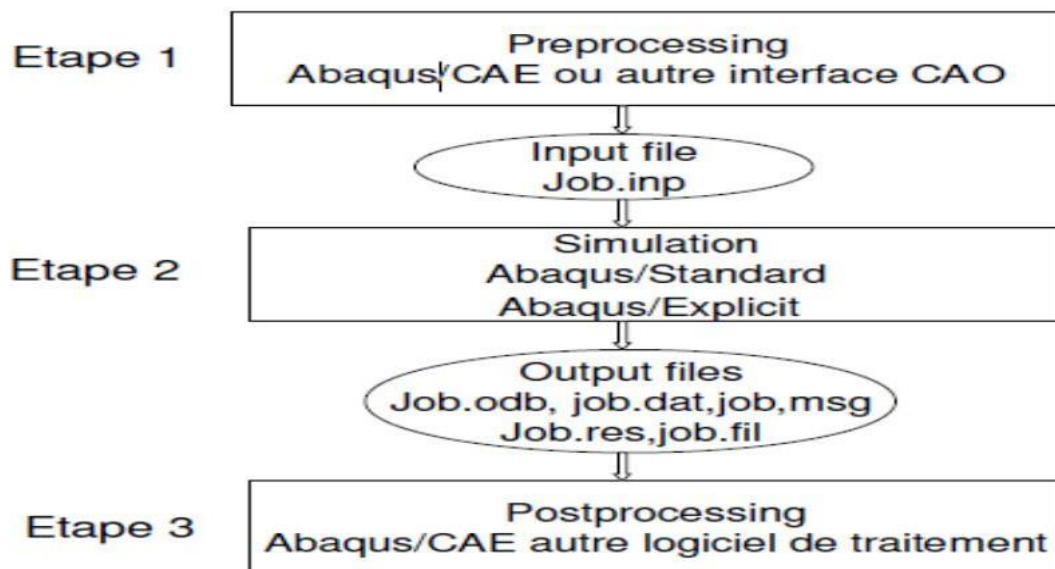


Figure III.4: Structure d'analyse sur ABAQUS [24]

### III.7 Construction du présent modèle sous ABAQUS CAE

Nous allons décrire toutes les étapes nécessaires à la modélisation d'un joint soudé à recouvrement, réalisé par procédé à point, dans deux types de nuances de matériaux : cuivre et acier. En raison de l'absence de symétrie, le modèle sera représenté dans son intégralité.

Pour résoudre ce problème avec ABAQUS, il est nécessaire de suivre successivement les étapes obligatoires listées ci-dessous.

### III.7.1 Modules d'ABAQUS/CAE

ABAQUS/CAE est structuré en différentes unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient des outils dédiés à une étape spécifique du processus de modélisation[19]:

- ❖ Le module esquisse "SKETCH"

Ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associées à un objet spécifique. Il peut être utilisé pour des opérations telles que les extrusions.

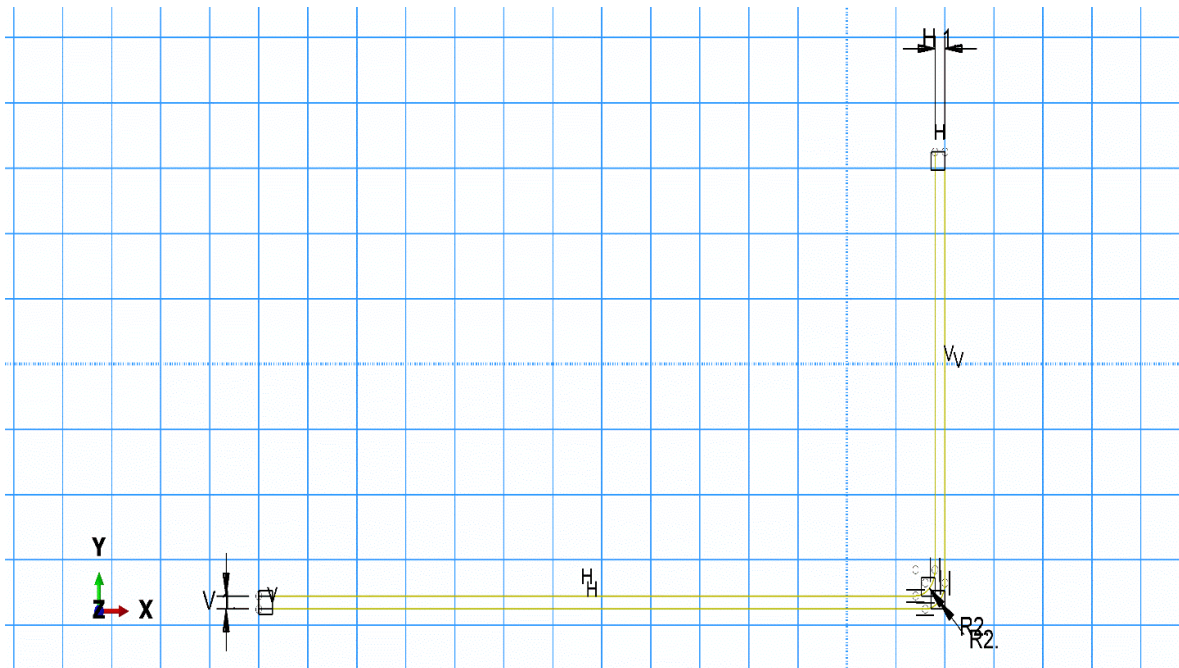
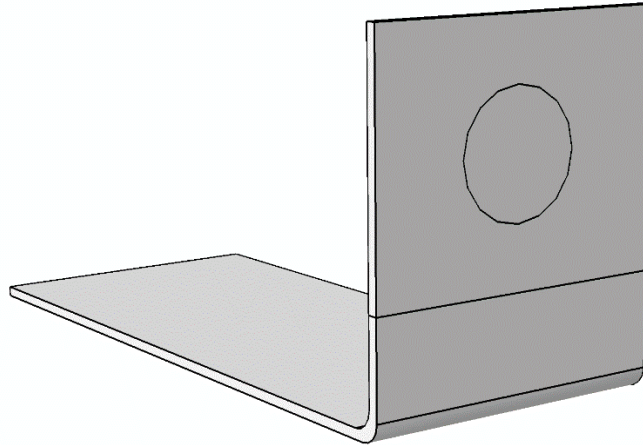


Figure III.5: Représentation 2D de la géométrie de l'éprouvette étudiée

- ❖ Le module parti "PART"

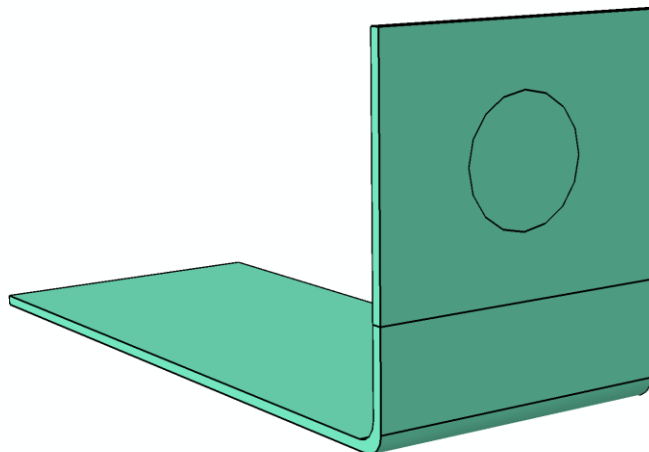
Le module Part permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à la modélisation du problème. Il est possible de dessiner ces objets directement dans ABAQUS/CAE ou de les importer depuis un logiciel de dessin tiers.



**Figure III.6 :** Représentation du corps rigide indéformable le modèle type à clin

Le module propriété "PROPERTY"

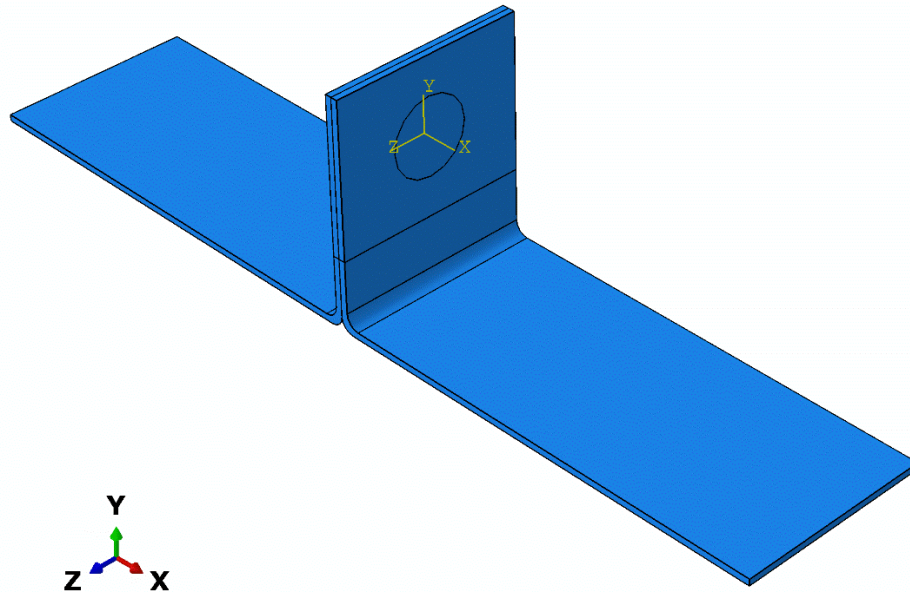
Ce module sert à définir toutes les propriétés associées à un objet géométrique ou à une partie de celui-ci, comme les propriétés des matériaux, les caractéristiques des sections, etc.



**Figure III.7:** Éprouvette en acier déformable

❖ Le module assemblage "ASSEMBLY"

Ce module permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Dans un modèle ABAQUS, il existe un seul assemblage qui regroupe toutes les pièces et les objets nécessaires à la simulation.



**Figure III.8:** Assemblage des éléments, (l'éprouvette étant comme un corps rigide)

❖ Le module étape "STEP"

Ce module permet de définir toutes les étapes du modèle, ainsi que les requêtes pour le post-traitement. Il spécifie le moment (temps) où une force est appliquée, ainsi que la durée pendant laquelle elle s'exerce. Il est également possible de créer des forces ou des conditions aux limites qui s'activent à des moments précis du processus.

❖ Le module interaction "INTERACTION"

Le module Interaction permet de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou d'autres types. Comme illustré dans la Figure III.9, ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies, car la simple proximité géométrique entre les objets n'est pas suffisante pour établir une interaction.

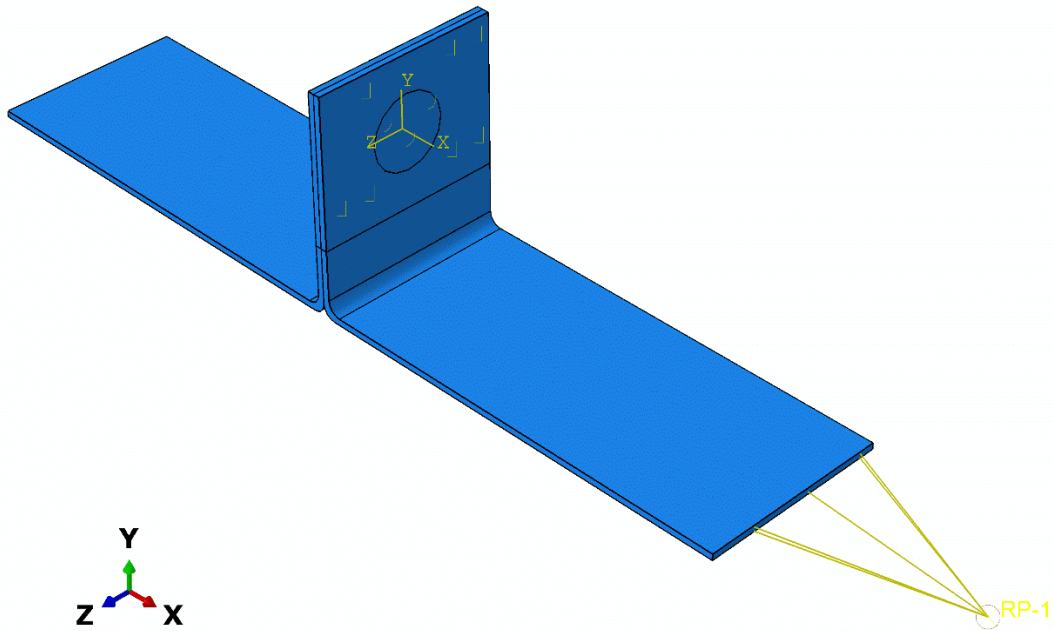


Figure III.9: Interaction entre les 2 éprouvettes

❖ Le module charge "LOAD"

Ce module permet de spécifier tous les chargements, les conditions limites et les champs associés, comme illustré dans la Figure III.10. Il est important de noter que les chargements et les conditions limites sont liés aux steps. Par exemple, une force peut être appliquée lors du step 1, mais être inactive au step 2.

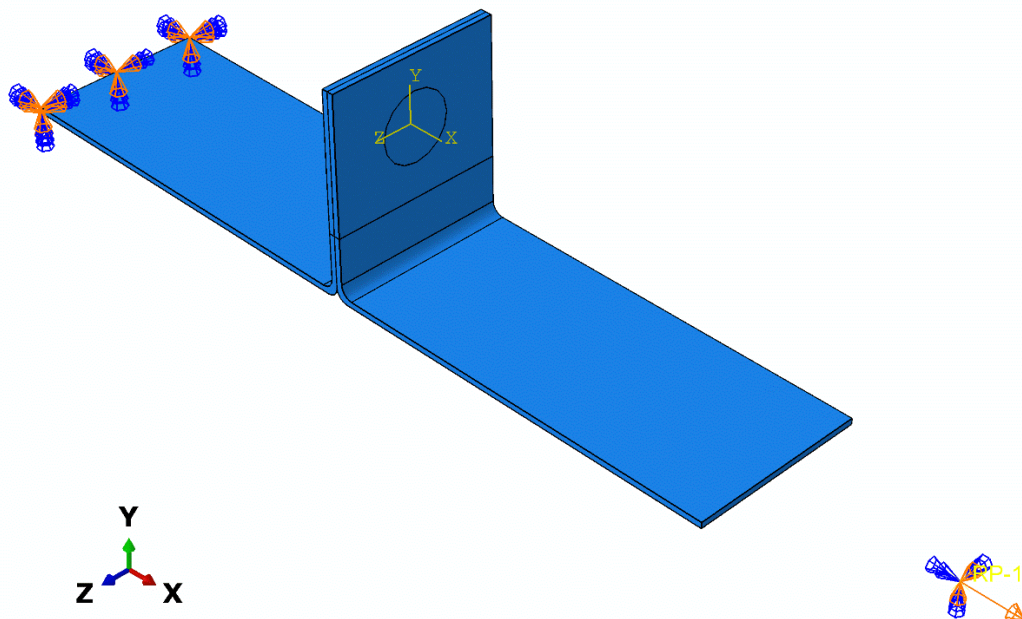


Figure III.10: Conditions limites et charges appliquées sur l'éprouvette

❖ Le module maillage "MESH"

Ce module réunit tous les outils nécessaires pour générer un maillage par éléments finis sur un assemblage. Dans la simulation présentée, nous avons opté pour un maillage à base d'éléments hexaédriques (voir Figure III.11 et III.12) de type médial axial, choix qui s'est révélé pertinent pour obtenir une précision numérique optimale, notamment en comparaison avec d'autres configurations de maillage.

Remarque : Il est recommandé de mailler uniquement le corps déformable séparément, car les deux parties (corps rigide) ne se déforment pas.

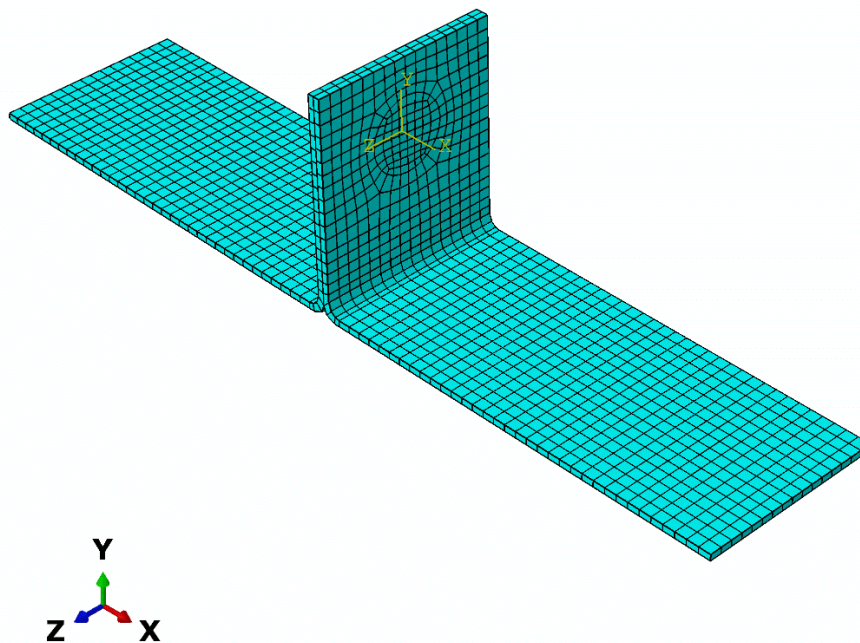


Figure III.11: Maillage de la structure du joint soudé par point

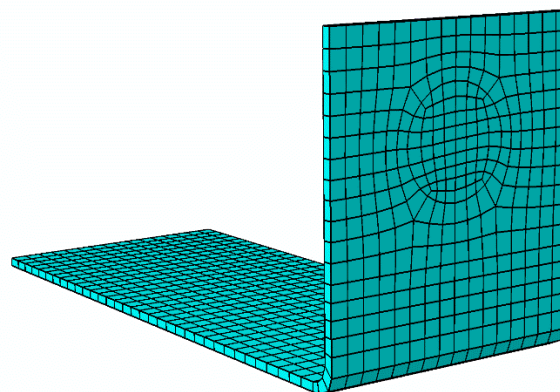


Figure III.12: Maillage raffiné au niveau de point de soudure

Remarque : Afin d'obtenir des résultats optimaux, un temps de calcul réduit et une bonne convergence, un maillage raffiné a été appliqué au niveau de l'interface des deux spécimens, en particulier dans la zone du point de soudure, comme illustré dans la Figure III.12.

❖ Le module simulation "JOB"

Une fois toutes les étapes de définition du modèle achevées, il est nécessaire d'utiliser le module Job pour lancer l'analyse du modèle. ABAQUS effectuera alors les calculs nécessaires et générera les résultats correspondants.

❖ Le module Visualisation "VISUALIZATION"

Ce module permet de visualiser les résultats obtenus, comme les courbes de charges et les déformations, comme montré dans la Figure III.13 et III.14. Une comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux sera présentée dans la section suivante.

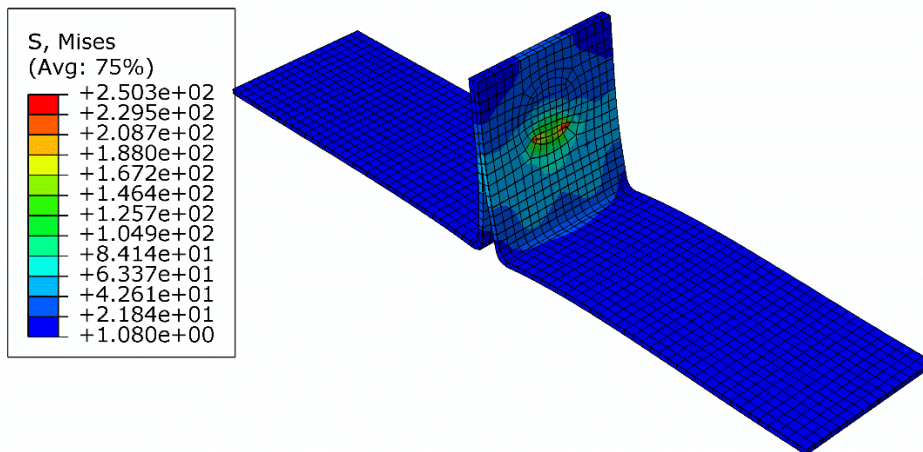


Figure III.13: Évolution de la contrainte équivalente de Von Mises au cours de la simulation

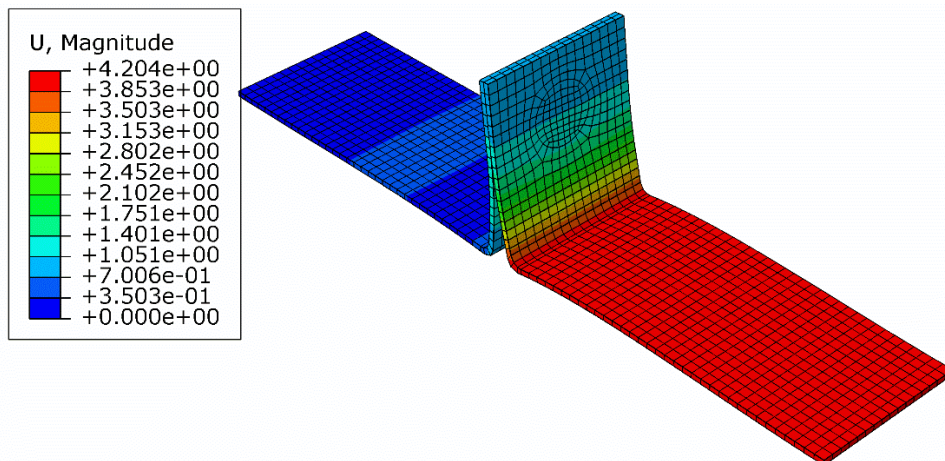


Figure III.14: Champ de déplacement global (U magnitude)

**III.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions générales relatives au code de calcul Abaqus, ainsi que les étapes nécessaires à la mise en œuvre de la simulation numérique du soudage par points. Cela inclut l'introduction du système de contact entre les deux pièces soudées, la définition des matériaux utilisés, ainsi que l'intégration de leurs principales propriétés mécaniques dans le modèle numérique.

Les résultats issus de la simulation, ainsi que leur analyse et leur interprétation, seront détaillés dans le chapitre suivant.



## *Chapitre IV*

### *Résultats et discussion*

## IV. Introduction

Ce chapitre présente les résultats issus des simulations numériques de l'essai de traction appliqué à des structures soudées par points. Ces simulations ont été effectuées sur plusieurs échantillons d'assemblages soudés, en faisant varier différents paramètres tels que le type de matériau, le diamètre des points de soudure, l'épaisseur des pièces, le nombre de points de soudure ainsi que leur position.

L'objectif de cette étude est de caractériser la distribution des contraintes, en particulier les concentrations locales de contraintes, ainsi que les valeurs maximales et nominales des contraintes.

Ces analyses permettent d'identifier les zones critiques susceptibles d'être à l'origine d'une rupture, en particulier dans les matériaux sensibles à l'amorçage de fissures. Les résultats obtenus fourniront également une base comparative pour les études paramétriques menées dans les sections suivantes.

### IV.1 Concentration des contraintes

Les zones de concentration des contraintes sont fréquemment les lieux d'amorçage des fissures de fatigue, mais elles peuvent aussi être à l'origine de ruptures brutales, notamment dans les matériaux fragiles, comme illustré sur la Figure IV.1. L'augmentation de la contrainte locale dans ces zones peut être quantifiée par le facteur de concentration des contraintes élastiques,  $Kt$ , qui est un paramètre clé dans l'analyse et la conception des structures. Le facteur  $Kt$  est défini comme le rapport entre la contrainte maximale au niveau de l'entaille  $\sigma_{max}$  et la contrainte nominale de référence  $\sigma_{nom}$  [25].  $Kt = \sigma_{max} / \sigma_{nom}$

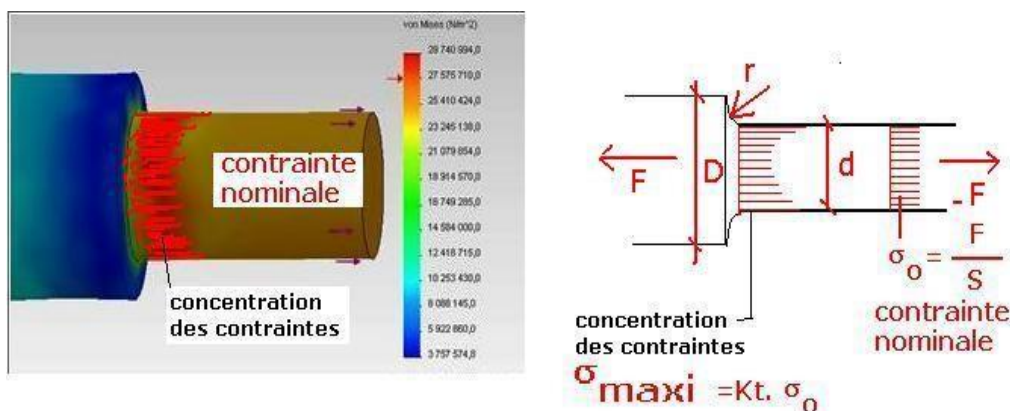


Figure IV.1: Concentration de contrainte dans une éprouvette entaillée sollicitée en traction. [26]

## IV.2 Critères de plasticité de Von Mises

Le tenseur des contraintes décrit les efforts internes appliqués à chaque volume unitaire de matière. Il permet de représenter avec précision l'état de contrainte à chaque point de la structure et est noté :

$$T(M) = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (IV.1)$$

Étant donné que les termes hors diagonale du tenseur des contraintes correspondent à des efforts de cisaillement, et qu'ils sont souvent exprimés dans la base vectorielle (X, Y, Z), le tenseur des contraintes peut également s'écrire sous la forme suivante :

$$T(M) = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (IV.2)$$

Les contraintes peuvent être exprimées dans une base appropriée, de sorte que le tenseur des contraintes devienne une matrice diagonale. Dans ce cas, on parle de contraintes principales, qui représentent les contraintes maximales, minimales et intermédiaires agissant sur la structure.

$$T(M) = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad (IV.3)$$

Le critère de Von Mises est le plus couramment utilisé.

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (IV.4)$$

Ou :

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)} \quad (IV.5)$$

Ce critère prend en compte les composantes des contraintes en traction, compression et cisaillement pour définir un niveau de contrainte isotrope, c'est-à-dire uniforme dans toutes

les directions. Toutefois, le critère de Von Mises ne précise pas le type de sollicitation, qu'il s'agisse de traction, de compression ou de cisaillement [27].

### IV.3 Présentation des matériaux

#### IV.3.1 Acier DC03

##### ➤ Définition

L'acier DC03 est un acier non allié pour emboutissage profond, normalisé par la norme EN 10130. Il appartient à la famille des aciers doux laminés à froid, caractérisés par leur excellente aptitude à la déformation plastique.

##### ➤ Classification :

- Type : Acier bas carbone (non allié)
- Norme : EN 10130 (équivalent ISO 3574)
- Désignation : "DC" = Deep Drawing Cold rolled (emboutissage profond à froid)

##### ➤ Caractéristiques chimiques

**Tableau IV.1:** Composition chimique de l'acier DC03

Designation	Carbone	Manganese	Phosphore	Soufre	Silicium
DC03	≤ 0.10	≤ 0.50	≤ 0.040	≤ 0.040	≤ 0.040

##### ➤ Domaine d'application

L'acier DC03 est principalement employé dans les industries nécessitant une bonne formabilité et une facilité d'emboutissage. Grâce à sa faible teneur en carbone et en impuretés, il permet la réalisation de pièces complexes sans risque de fissuration.

Dans le secteur automobile, il est utilisé pour fabriquer des éléments de carrosserie comme les portières, les capots et les ailes, où la précision des formes est essentielle. L'électroménager l'exploite pour les carcasses de machines à laver, de fours ou de réfrigérateurs, où sa ductilité facilite les déformations profondes.

L'emballage métallique (boîtes, couvercles) et le mobilier (structures légères, tôles décoratives) bénéficient également de ses propriétés, combinées à son coût modéré. Enfin, sa compatibilité avec les revêtements (peinture, galvanisation) en fait un choix polyvalent pour des applications nécessitant une résistance à la corrosion.

Ainsi, le DC03 s'impose comme un matériau économique et performant pour les pièces soumises à des déformations importantes, mais ne requérant pas une haute résistance mécanique.

### IV.3.2 Cuivre

#### ➤ définition

Le cuivre est un métal de transition de couleur rouge-orangée, caractérisé par sa haute conductivité électrique et thermique, sa ductilité et sa résistance à la corrosion. Ce matériau est largement utilisé dans des applications industrielles telles que les câblages électriques, les composants électroniques, les échangeurs thermiques et la fabrication de pièces en alliages.

#### ➤ Classification du cuivre

Le cuivre peut être classifié selon sa pureté ou selon les alliages dans lesquels il est utilisé. Voici deux principales classifications :

**Cuivre pur** : le cuivre pur est un matériau non allié, avec une teneur minimale de 99,9 % de cuivre. Il est très utilisé pour les câbles électriques et les composants électroniques.

**Cuivre allié** : le cuivre peut être allié avec d'autres éléments tels que le zinc (laiton), l'étain (bronze), l'aluminium, et d'autres pour améliorer certaines propriétés mécaniques ou de résistance à la corrosion.

#### ➤ Les caractéristiques chimiques du cuivre pur

**Tableau IV.2:** Composition chimique du cuivre

Élément	Cuivre (Cu)	Impuretés
Pourcentage (%)	99.9 %	0.1 %

➤ **domaine d'application**

Le cuivre est un métal polyvalent largement utilisé dans diverses industries en raison de ses propriétés exceptionnelles telles que sa conductivité électrique et thermique, sa résistance à la corrosion, sa ductilité et sa malléabilité. Dans l'industrie électrique et électronique, il est principalement utilisé pour le câblage électrique et la fabrication de composants électroniques comme les circuits imprimés. Dans le secteur de la construction, il est couramment employé pour la fabrication de tuyaux, de gouttières et pour les toitures en raison de sa résistance à la corrosion. En automobile, le cuivre est utilisé dans les systèmes de freinage, ainsi que pour les radiateurs et échangeurs thermiques. Il trouve également une large application dans l'industrie chimique et pétrochimique, notamment pour la fabrication d'échangeurs thermiques et de réacteurs résistants à la corrosion. Le cuivre est aussi utilisé dans la fabrication de pièces de monnaie et de médailles, ainsi que dans les alliages comme le laiton et le bronze, utilisés pour des applications mécaniques. Enfin, le cuivre est un matériau prisé dans la bijouterie et dans les applications maritimes, où il est utilisé dans la construction de navires et d'autres composants résistants à la corrosion marine. Grâce à sa polyvalence, le cuivre est un matériau clé dans de nombreux secteurs industriels et technologiques.

### IV.3.3 Paramètres utilisés

Le Tableau IV.3 ci-dessous résume les principales propriétés des matériaux utilisés dans cette étude, à savoir l'acier DC03 et le cuivre pur. Ces paramètres sont essentiels pour la simulation numérique des comportements mécaniques sous chargement uniaxial.

**Tableau IV.3:** Les paramètres utilisés

Acier	DC03	Cuivre pur
Module de Young E (GPa)	210 GPa	110 GPa
Coefficient de Poisson $\nu$ (sans unité)	0.33	0.34
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	$7.85 \times 10^{-3}$ kg/m <sup>3</sup>	$8.96 \times 10^{-3}$ kg/m <sup>3</sup>
Contrainte plastique (MPa)	250-400 Mpa	210-250 MPa
Déformation plastique	0-0.28	0-0.15
Déformation à la rupture	0.35	0.4
Taux de déformation (s <sup>-1</sup> )	0	0
Triaxialité des contraintes	0.33	0.33

## IV.4 Étude du cas de référence : assemblage acier-acier

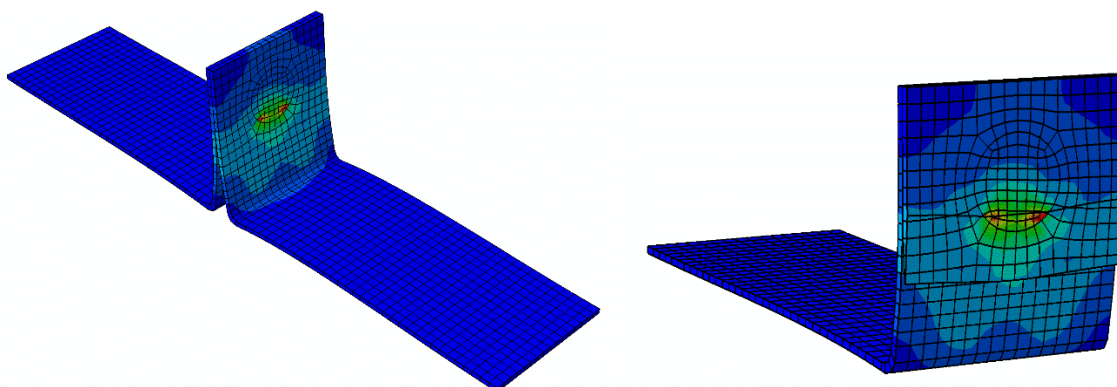
Dans cette section, nous nous concentrons sur l'analyse d'un cas de référence permettant d'établir une base comparative pour l'ensemble des études paramétriques ultérieures. Il s'agit d'un assemblage composé de deux tôles en acier DC03, chacune d'une épaisseur de 1 mm, reliées par un unique point de soudure par résistance d'un diamètre de 12 mm. Cet assemblage est soumis à une sollicitation en traction uniaxiale, avec une charge appliquée de 4 mm.

Ce cas permet d'observer le comportement mécanique typique d'une liaison soudée acier-acier sous contrainte, notamment la répartition des contraintes dans la zone de soudure, la localisation des concentrations de contraintes, ainsi que le mode de déformation du matériau. L'objectif est de caractériser précisément la réponse de la structure dans des conditions standard, avant de faire varier les paramètres géométriques ou les matériaux dans les sections suivantes.

### ✓ Résultat de la simulation

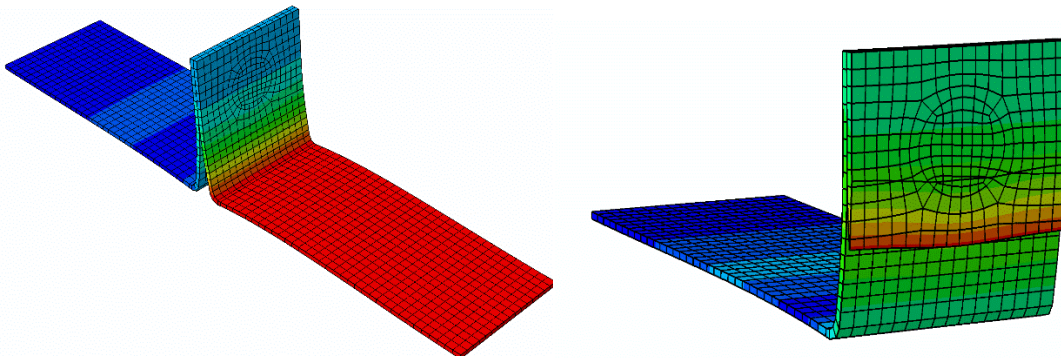
Les résultats de la simulation numérique de l'essai de traction appliqué au cas de référence sont présentés ci-dessous, permettant une analyse approfondie du comportement de la structure sous l'effet de la charge appliquée. Les figures suivantes illustrent la répartition des contraintes et des déplacements dans la structure.

#### IV.4.1 Distribution des champs mécaniques : contraintes et déplacements



**Figure IV.2:** Évolution de la contrainte équivalente de Von Mises au cours de la simulation

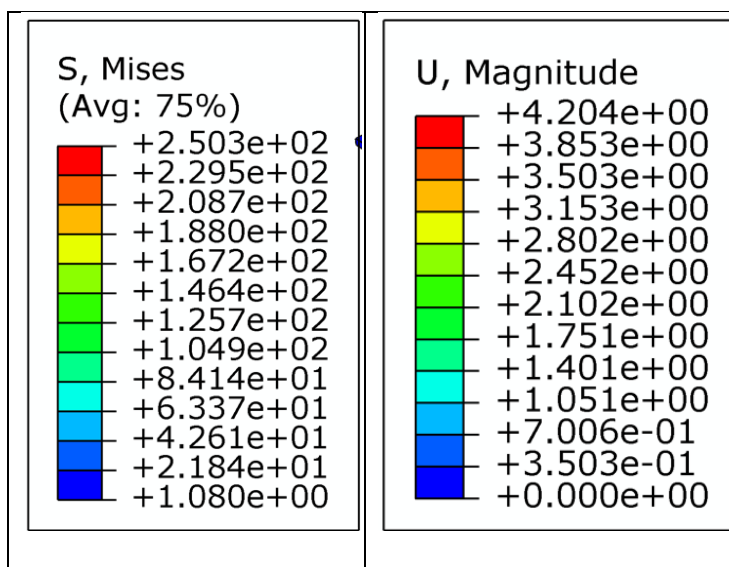
- ❖ La Figure IV.2 montre l'évolution de la contrainte équivalente de Von Mises au cours de la simulation. On observe que la concentration des contraintes est plus élevée au niveau du point de soudure, avec une contrainte maximale représentée en rouge. On remarque également, en vert, des contraintes modérées au niveau de la partie inférieure allongée ainsi qu'au niveau du point de soudure. Le reste de l'éprouvette présente des contraintes nulles ou faibles, indiquées par la couleur bleue.



**Figure IV.3:** Champ de déplacement global (U magnitude)

- ❖ La Figure IV.3 montre le champ de déplacement global (U magnitude). On observe que le pavé de gauche, en bleu sombre, correspond à la zone encastree où les déplacements sont nuls ou très faibles. En remontant la “jambe” verticale, la couleur passe du bleu au vert puis au jaune, ce qui indique que la structure se déforme progressivement sous l'effet de levier. Enfin, la plaque de droite, uniformément rouge, subit une translation quasi rigide avec un déplacement maximal.

**Tableau IV.4:** Synthèse des résultats numériques (contraintes de Von Mises, magnitude U)

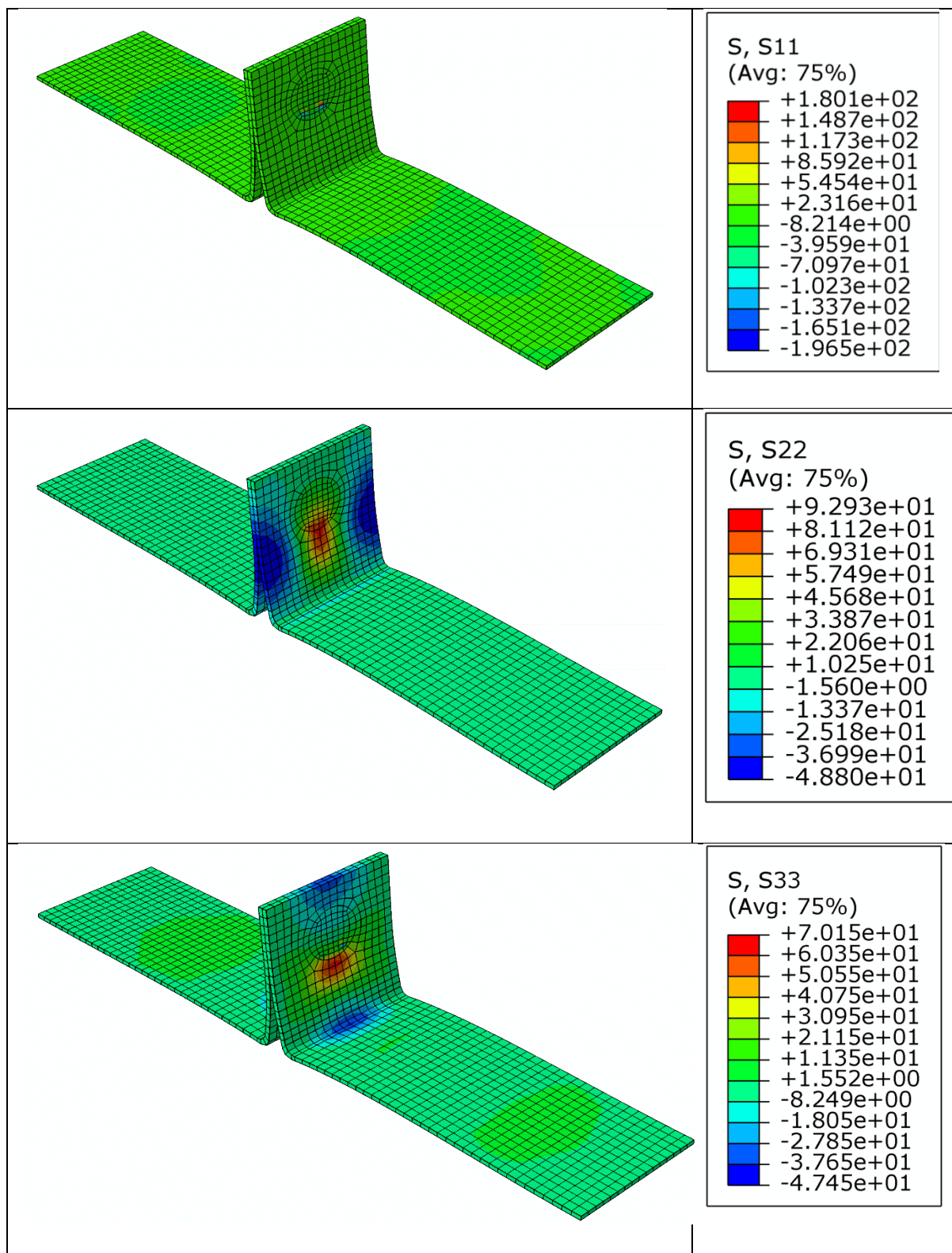


❖ Le Tableau IV.4 présente des résultats numériques incluant les contraintes de Von Mises et la magnitude des déplacements (U). Les déplacements varient entre 0 mm, au niveau des zones fixées, et 4.204 mm, correspondant à l’allongement imposé. Les contraintes de Von Mises s’étendent de 1.08 MPa à 250.3 MPa, traduisant une sollicitation mécanique importante, mais restant dans le domaine élastique de l’acier DC03.

#### IV.4.2 Champs de contraintes normales (S11, S22, S33)

Le Tableau IV.5 ci-dessous présente les figures représentant les champs de contraintes normales (S11, S22 et S33), accompagnées des valeurs correspondantes extraites à l’issue des simulations numériques effectuées sous Abaqus.

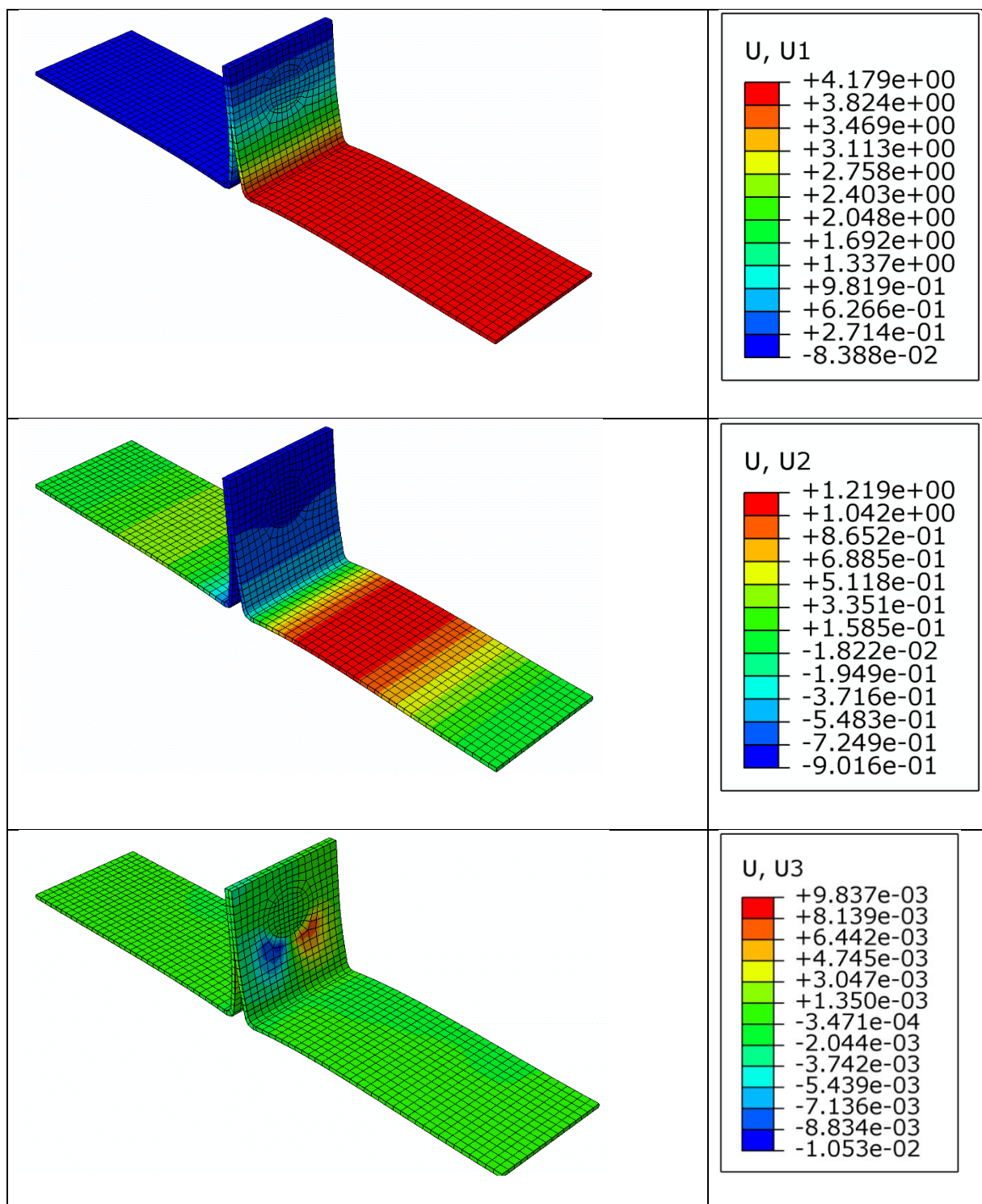
Tableau IV.5: Résultats des contraintes normales simulées dans le cas acier-acier



IV.4.3 Déplacements selon les directions principales (U1, U2, U3)

Le Tableau IV.6 ci-dessous regroupe les figures illustrant les champs de déplacement horizontal (U1, U2 et U3), ainsi que les valeurs correspondantes extraites à l'issue des simulations numériques réalisées sous Abaqus.

Tableau IV.6: Résultats des déplacements horizontaux (U) dans le cas acier-acier



## IV.5 Étude paramétrique

### IV.5.1 Influence du type de matériau

Dans cette étape de l'étude, des simulations numériques ont été réalisées sur des modèles représentant des pièces en acier (DC 03) et en cuivre. Chaque matériau a été testé dans deux configurations différentes : acier-cuivre et cuivre-cuivre. Les pièces utilisées dans toutes les simulations ont les mêmes dimensions, à savoir une épaisseur de 1 mm et un diamètre de 12 mm pour les points de soudure. Les simulations ont été réalisées en appliquant une charge de traction sur les échantillons, générant un allongement de 4 mm. Ces simulations visent à comparer les comportements mécaniques des différentes combinaisons de matériaux en termes de distribution des contraintes et des déplacements.

#### ✓ Résultats de la simulation

Les Figures IV.4 et IV.5 représentant la distribution des contraintes de Von Mises pour les deux cas, acier-cuivre et cuivre-cuivre.

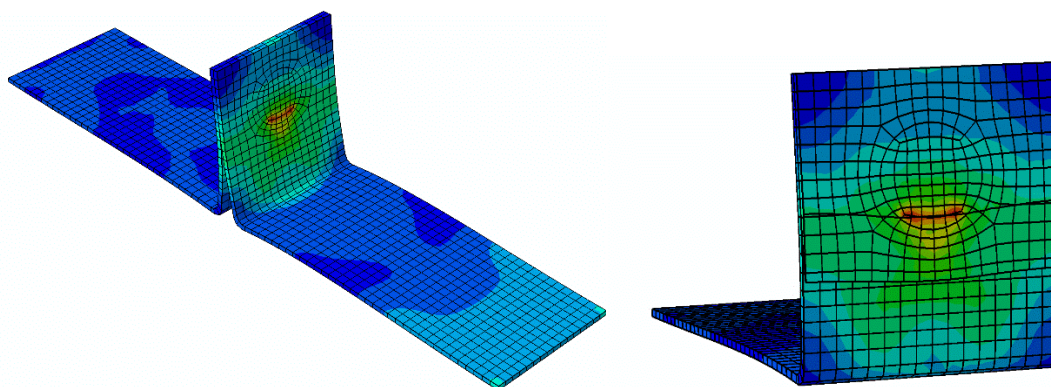


Figure IV.4: Contrainte de Von Mises pour cuivre-cuivre

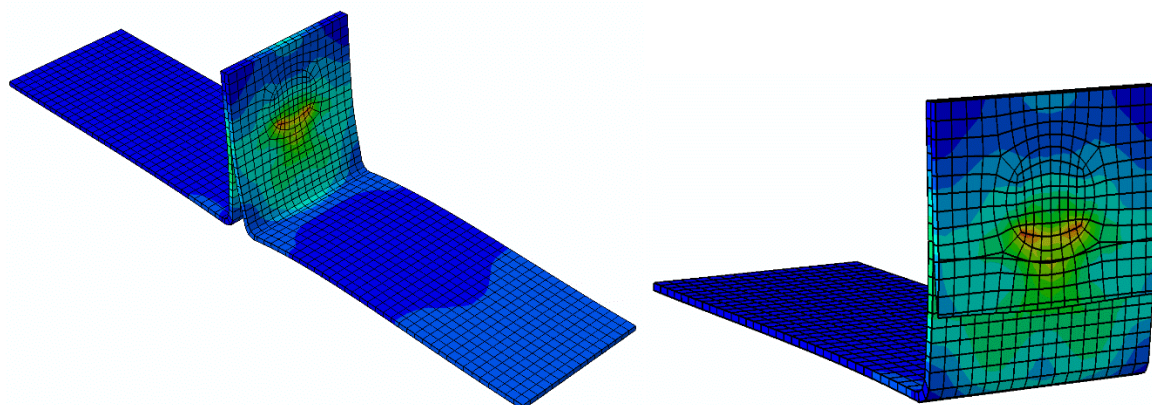


Figure IV.5 : Contrainte de Von Mises pour acier-cuivre

- ❖ Une concentration élevée des contraintes est observée au niveau du point de soudure, avec une contrainte maximale représentée en rouge dans les trois cas étudiés : acier-acier (cas de référence), cuivre-cuivre et acier-cuivre. On observe également, en vert, des contraintes modérées localisées à la fois au niveau du point de soudure et dans la partie inférieure allongée de l'éprouvette pour les trois configurations. Toutefois, dans les cas acier-cuivre et cuivre-cuivre, la zone verte s'étend plus largement vers le bas, traduisant une répartition plus étendue des contraintes en dessous du point de soudure par rapport au cas acier-acier. Enfin, le reste de l'éprouvette présente des contraintes nulles ou très faibles, indiquées par la couleur bleue.

**Tableau IV.7:** Valeurs des contraintes de Von Mises traitées par ABAQUS pour acier-acier (cas de référence), cuivre-cuivre, acier-cuivre

Acier-Acier (Cas de référence)	Acier-Cuivre	Cuivre-Cuivre
<p>S, Mises (Avg: 75%)</p> <p>+2.503e+02 +2.295e+02 +2.087e+02 +1.880e+02 +1.672e+02 +1.464e+02 +1.257e+02 +1.049e+02 +8.414e+01 +6.337e+01 +4.261e+01 +2.184e+01 +1.080e+00</p>	<p>S, Mises (Avg: 75%)</p> <p>+9.620e+01 +8.825e+01 +8.030e+01 +7.235e+01 +6.440e+01 +5.646e+01 +4.851e+01 +4.056e+01 +3.261e+01 +2.466e+01 +1.671e+01 +8.765e+00 +8.165e-01</p>	<p>S, Mises (Avg: 75%)</p> <p>+7.013e+01 +6.440e+01 +5.867e+01 +5.294e+01 +4.722e+01 +4.149e+01 +3.576e+01 +3.003e+01 +2.430e+01 +1.857e+01 +1.284e+01 +7.113e+00 +1.384e+00</p>

**Tableau IV.8:** Valeurs des contraintes maximales et minimales par type d'assemblage pour acier-acier (cas de référence), cuivre –cuivre, acier-cuivre

Type d'assemblage	Contrainte max (MPa)	Contrainte min (MPa)
Acier-acier (Réf.)	2.503 e+02	1.08 e+00
Cuivre-cuivre	7.013 e+01	1.384 e+00
Acier-cuivre	9.620 e+01	8.165 e-01

- ❖ À partir du Tableau IV.7 et IV.8 la contrainte maximale est la plus élevée pour l'assemblage Acier-Acier, avec 250,3 MPa, suivie par l'assemblage Acier-Cuivre à 96,2 MPa, et enfin l'assemblage Cuivre-Cuivre à 70,13 MPa. Cela indique que l'assemblage acier-acier est le plus résistant, tandis que l'assemblage cuivre-cuivre est le moins capable de supporter de fortes charges. Pour la contrainte minimale, l'assemblage Acier-Cuivre présente la contrainte minimale la plus faible (0,8165 MPa), tandis que l'assemblage Cuivre-Cuivre montre la contrainte minimale la plus élevée (1,384 MPa), ce qui suggère que le Cuivre-Cuivre est plus rigide sous des charges minimales comparé aux autres assemblages.

### IV.5.2 Influence de la charge de traction

Dans cette section, nous examinons l'impact de la charge de traction appliquée sur les simulations réalisées pour le cas acier-acier. En utilisant un modèle d'échantillon en acier DC03, nous avons effectué des simulations avec différentes charges de traction : 2 mm, 4 mm (cas de référence) et 6 mm. L'objectif de cette étude est d'analyser comment ces variations de charge influencent la distribution des contraintes et des déplacements au niveau des points de soudure et des zones critiques du matériau.

#### ✓ Résultats de la simulation

Les Figures IV.6 et IV.7 illustrent la distribution des contraintes de Von Mises pour les deux cas étudiés : acier-acier sous différentes charges de traction de 2 mm et 6 mm.

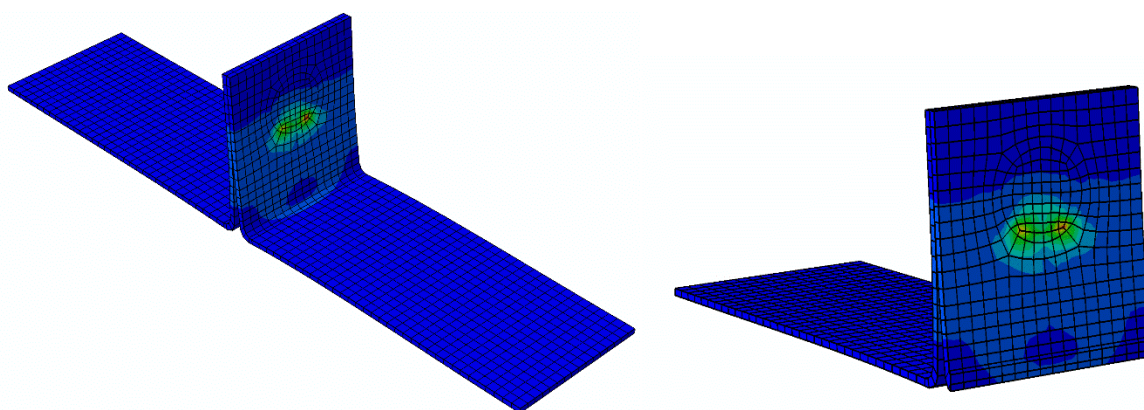


Figure IV.6 : Contrainte de Von Mises pour C = 2 mm

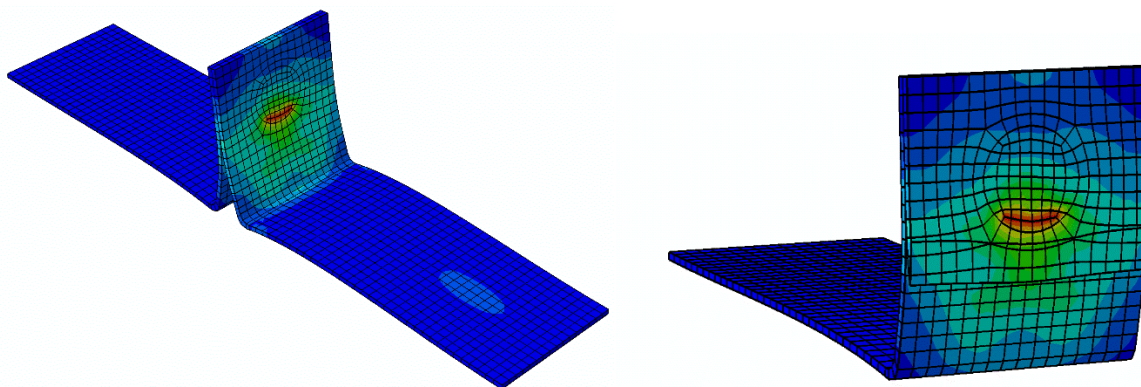


Figure IV.7: Contrainte de Von Mises pour C = 6 mm

❖ Une concentration élevée des contraintes est observée au niveau du point de soudure, avec une contrainte maximale représentée en rouge dans les trois cas. Cette contrainte devient particulièrement importante pour un déplacement de 6 mm, où la zone rouge est plus étendue, indiquant une sollicitation mécanique plus intense. On observe également, en vert, des contraintes modérées localisées à la fois au niveau du point de soudure et dans la partie inférieure allongée de l'éprouvette. Cette zone verte est plus développée dans le cas du déplacement de 6 mm, traduisant une répartition plus étendue des contraintes vers le bas par rapport aux cas de 2 mm et de 4 mm. Enfin, le reste de l'éprouvette est soumis à des contraintes faibles ou nulles, représentées en bleu.

Tableau IV.9: Valeurs des contraintes de Von Mises traitées par ABAQUS pour C = 2 mm, C = 4 mm (cas de référence), C = 6 mm

Pour C = 2 mm	Pour C = 4 mm	Pour C = 6 mm
<p>S, Mises (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+1.446e+02</li> <li>+1.327e+02</li> <li>+1.207e+02</li> <li>+1.087e+02</li> <li>+9.670e+01</li> <li>+8.472e+01</li> <li>+7.273e+01</li> <li>+6.075e+01</li> <li>+4.877e+01</li> <li>+3.678e+01</li> <li>+2.480e+01</li> <li>+1.282e+01</li> <li>+8.336e-01</li> </ul>	<p>S, Mises (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+2.503e+02</li> <li>+2.295e+02</li> <li>+2.087e+02</li> <li>+1.880e+02</li> <li>+1.672e+02</li> <li>+1.464e+02</li> <li>+1.257e+02</li> <li>+1.049e+02</li> <li>+8.414e+01</li> <li>+6.337e+01</li> <li>+4.261e+01</li> <li>+2.184e+01</li> <li>+1.080e+00</li> </ul>	<p>S, Mises (Avg: 75%)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+2.648e+02</li> <li>+2.428e+02</li> <li>+2.209e+02</li> <li>+1.989e+02</li> <li>+1.770e+02</li> <li>+1.550e+02</li> <li>+1.331e+02</li> <li>+1.112e+02</li> <li>+8.920e+01</li> <li>+6.726e+01</li> <li>+4.531e+01</li> <li>+2.337e+01</li> <li>+1.423e+00</li> </ul>

**Tableau IV.10:** Valeurs des contraintes maximales et minimales pour différentes charges pour C = 2 mm, C = 4 mm (cas de référence), C = 6 mm

Charge (mm)	Contrainte max (MPa)	Contrainte min (MPa)
C = 2 mm	1.446 e+02	8.336 e-01
C = 4 mm (réf)	2.503 e+02	1.08 e+00
C = 6 mm	2.648 e+02	1.423 e+00

- ❖ À partir du Tableau IV.9 et IV.10 La contrainte maximale augmente avec la charge, passant de 144,6 MPa à 264,8 MPa lorsque la charge passe de 2 mm à 6 mm, ce qui indique que le matériau devient plus résistant à mesure que la charge augmente. En ce qui concerne la contrainte minimale, elle augmente également, passant de 0,833 MPa à 1,423 MPa entre 2 mm et 6 mm, ce qui suggère que le matériau devient plus rigide sous des charges plus élevées.

### IV.5.3 Influence du diamètre

Dans cette section, nous étudions l'effet de la variation du diamètre du point de soudure sur le comportement mécanique de l'assemblage acier-acier (DC03), en conservant la même charge de traction (4 mm). Trois diamètres ont été analysés : 12 mm (cas de référence), 13 mm et 14 mm. L'objectif est d'évaluer l'influence de cette géométrie sur la distribution des contraintes et des déplacements autour de la zone soudée.

#### ✓ Résultats de la simulation

Les Figures IV.8 et IV.9 illustrent la distribution des contraintes de Von Mises pour les deux cas étudiés : acier-acier sous différents diamètres D = 13 mm et D = 14 mm.

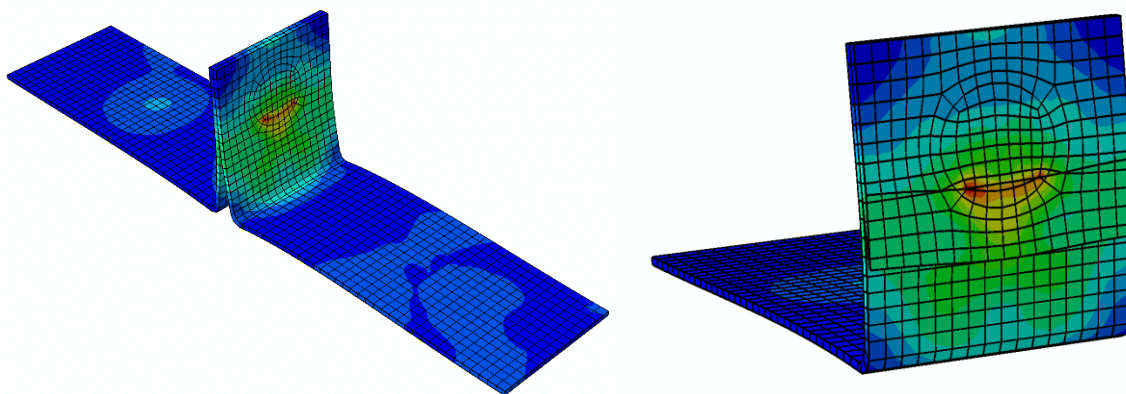


Figure IV.8: Contrainte de Von Mises pour  $D = 13$  mm

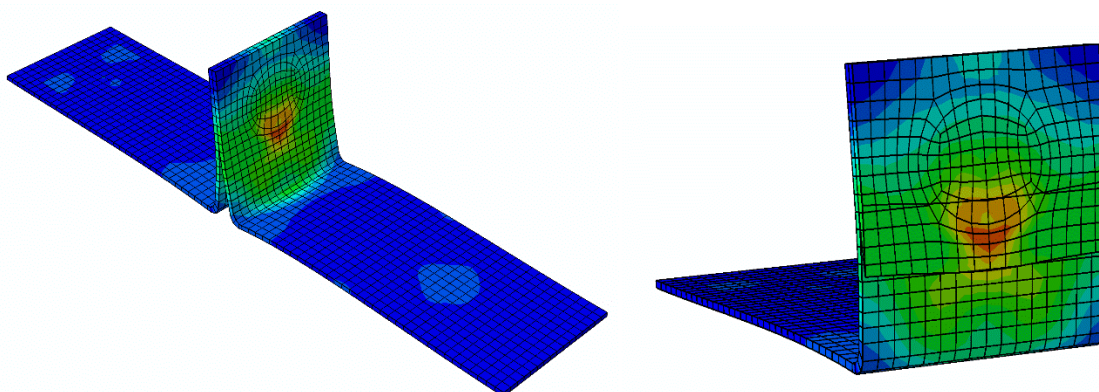
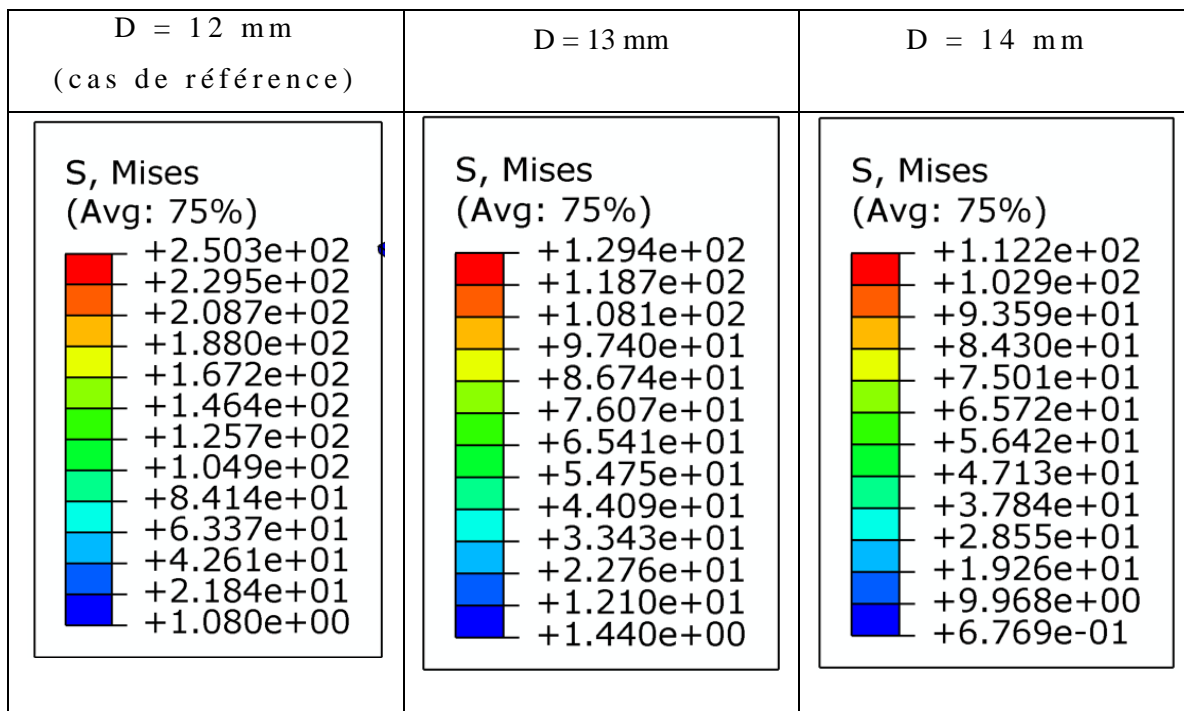


Figure IV.9: Contrainte de Von Mises pour  $D = 14$  mm

- ❖ Une concentration élevée des contraintes est observée au niveau de la partie inférieure du point de soudure, avec une contrainte maximale représentée en rouge dans les trois cas. Cette contrainte devient particulièrement marquée pour les diamètres  $D = 13$  mm et  $D = 14$  mm, où la zone rouge s'étend davantage, traduisant une sollicitation mécanique plus intense. On observe également, en vert, des contraintes modérées localisées à la fois au niveau du point de soudure et dans la partie inférieure allongée de l'éprouvette. Cette zone verte est plus développée le long de la partie verticale de l'éprouvette pour les diamètres  $D = 13$  mm et  $D = 14$  mm, indiquant une répartition plus étendue des contraintes vers le bas par rapport au cas  $D = 12$  mm. Enfin, le reste de l'éprouvette présente des contraintes faibles ou nulles, représentées en bleu.

**Tableau IV.11:** Valeurs des contraintes de Von Mises traitées par ABAQUS pour : Valeurs des contraintes de Von Mises traitées par ABAQUS pour D =12 mm (cas de référence), D =13 mm, D =14mm



**Tableau IV.12:** Valeurs des contraintes maximales et minimales pour différents diamètres pour D =12 mm (cas de référence), D =13 mm, D =14mm

Diamètre (mm)	Contrainte max (MPa)	Contrainte min (MPa)
12 mm (Réf.)	2.503 e+02	1.08 e+00
13 mm	1.294e+02	1.44e+00
14 mm	1.122 e+02	6.769 e-01

❖ À partir du Tableau IV.11 et IV.12 La contrainte maximale diminue avec l'augmentation du diamètre, passant de 250,3 MPa à 112,2 MPa entre 12 mm et 14 mm, ce qui suggère que le matériau devient moins résistant à mesure que son diamètre augmente. Quant à la contrainte minimale, elle augmente légèrement de 1,08 MPa à 1,44 MPa, puis diminue à 0,677 MPa lorsque le diamètre passe de 13 mm à 14 mm, ce qui pourrait indiquer une variation de la rigidité du matériau selon le diamètre.

#### IV.5.4 Influence de l'épaisseur

Dans cette section, nous analysons l'influence de l'épaisseur des pièces sur le comportement mécanique de l'assemblage acier-acier (DC03), sous une charge de traction constante de 4 mm et un diamètre de point de soudure de 12 mm. Trois épaisseurs ont été étudiées : 1 mm (cas de référence), 3 mm et 4 mm. Cette analyse vise à observer l'effet de l'épaisseur sur la distribution des contraintes et les déplacements dans la zone de soudure.

##### ✓ Résultats de la simulation

Les Figures IV.10 et IV.11 illustrent la distribution des contraintes de Von Mises pour les deux cas étudiés : acier-acier sous différentes épaisseurs  $e = 1$  mm (cas de référence),  $e = 3$  mm,  $e = 4$  mm.

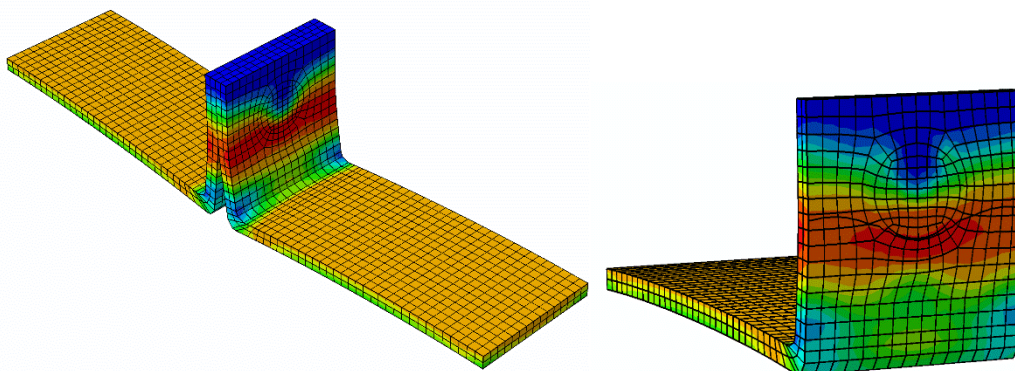


Figure IV.10: Contrainte de Von Mises pour  $e = 3$  mm

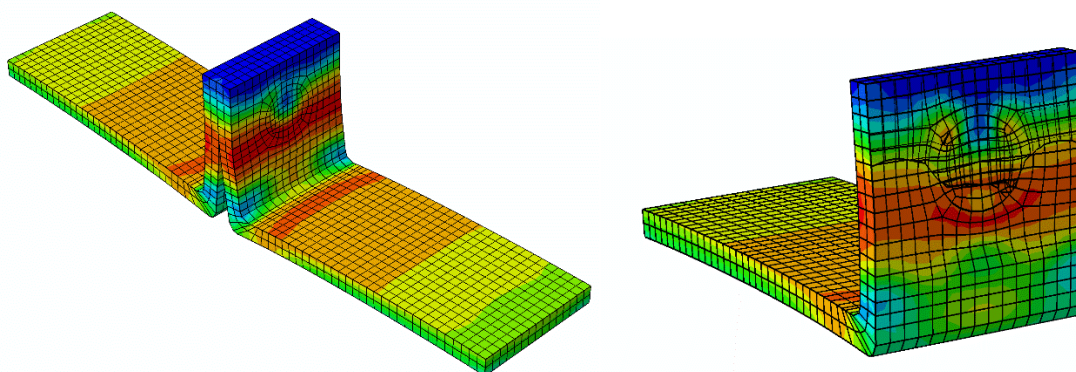





Figure IV.11: Contrainte de Von Mises pour  $e = 4$  mm

- ❖ Pour le cas de référence ( $e = 1 \text{ mm}$ ), une concentration élevée des contraintes au niveau du point de soudure, avec une contrainte maximale représentée en rouge. Des contraintes modérées, indiquées en vert, apparaissent également dans la partie inférieure allongée de l'éprouvette, ainsi qu'autour du point de soudure. Le reste de l'éprouvette présente des contraintes faibles ou nulles, représentées en bleu.
- ❖ En revanche, pour les épaisseurs plus importantes ( $e = 3 \text{ mm}$  et  $e = 4 \text{ mm}$ ), on observe une répartition plus progressive des contraintes. Une zone rouge vif, toujours centrée au niveau du point de soudure, indique la concentration maximale des contraintes. Autour de cette zone centrale, des teintes orange et jaune apparaissent et s'étendent vers le haut et le bas de l'éprouvette. Ces couleurs traduisent une diffusion plus large des efforts mécaniques, permise par l'augmentation de l'épaisseur, qui rigidifie la structure. Plus loin du point soudé, on retrouve des nuances vertes, puis bleues, correspondant respectivement à des contraintes modérées à faibles et quasi nulles.

**Tableau IV.13 :** Valeurs des contraintes de Von Mises traitées par ABAQUS pour  $e = 1 \text{ mm}$  (cas de référence),  $e = 3 \text{ mm}$ ,  $e = 4 \text{ mm}$

Pour $e = 1 \text{ mm}$ (cas de référence)	Pour $e = 3 \text{ mm}$	Pour $e = 4 \text{ mm}$
<p>S, Mises (Avg: 75%)</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>+2.503e+02</li> <li>+2.295e+02</li> <li>+2.087e+02</li> <li>+1.880e+02</li> <li>+1.672e+02</li> <li>+1.464e+02</li> <li>+1.257e+02</li> <li>+1.049e+02</li> <li>+8.414e+01</li> <li>+6.337e+01</li> <li>+4.261e+01</li> <li>+2.184e+01</li> <li>+1.080e+00</li> </ul>	<p>S, Mises (Avg: 75%)</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>+3.195e+02</li> <li>+2.931e+02</li> <li>+2.667e+02</li> <li>+2.404e+02</li> <li>+2.140e+02</li> <li>+1.876e+02</li> <li>+1.613e+02</li> <li>+1.349e+02</li> <li>+1.086e+02</li> <li>+8.219e+01</li> <li>+5.582e+01</li> <li>+2.946e+01</li> <li>+3.096e+00</li> </ul>	<p>S, Mises (Avg: 75%)</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>+3.254e+02</li> <li>+2.989e+02</li> <li>+2.724e+02</li> <li>+2.459e+02</li> <li>+2.194e+02</li> <li>+1.929e+02</li> <li>+1.664e+02</li> <li>+1.399e+02</li> <li>+1.134e+02</li> <li>+8.687e+01</li> <li>+6.037e+01</li> <li>+3.387e+01</li> <li>+7.372e+00</li> </ul>

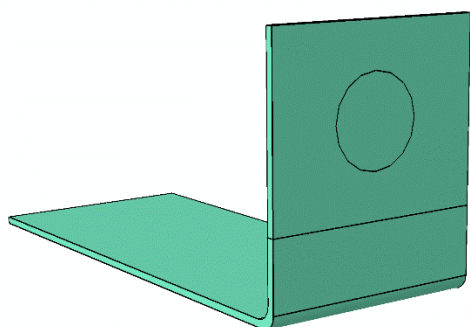
**Tableau IV.14:** Valeurs des contraintes maximales et minimales pour différentes épaisseurs pour  $e = 1$  mm (cas de référence),  $e = 3$  mm,  $e = 4$  mm

Épaisseur (mm)	Contrainte max (MPa)	Contrainte min (MPa)
1 mm (Réf.)	2.503 e+02	1.08 e+00
3 mm	3.195 e+02	3.096 e+00
4 mm	3.254 e+02	7.372e+00

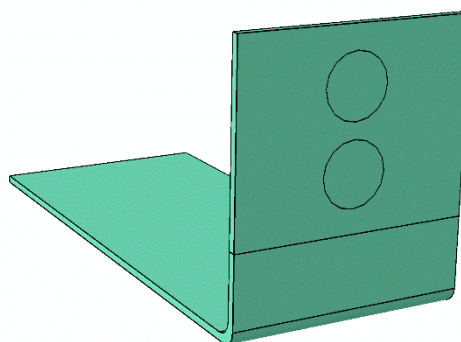
- ❖ À partir du Tableau IV.13 et I.14 La contrainte maximale augmente avec l'épaisseur du matériau, passant de 250,3 MPa à 325,4 MPa lorsque l'épaisseur passe de 1 mm à 4 mm, ce qui montre que le matériau devient plus résistant à mesure qu'il s'épaissit. La contrainte minimale augmente aussi, mais de façon moins importante, passant de 1,08 MPa à 7,372 MPa. Cela indique que le matériau devient plus rigide et moins flexible à mesure que son épaisseur augmente.

#### IV.5.5 Influence du nombre de points de soudure

Dans cette partie, nous étudions l'impact du nombre de points de soudure sur le comportement mécanique de l'assemblage acier-acier (DC03). Le cas de référence comporte un seul point de soudure de 12 mm de diamètre. Ce cas est comparé à une configuration avec deux points de soudure parallèles, chacun ayant un diamètre de 8 mm. (Voir la Figure IV.13 et IV.12).



**Figure IV.13:** Échantillon avec 1 point soudé  $D=12$  mm (cas de référence)

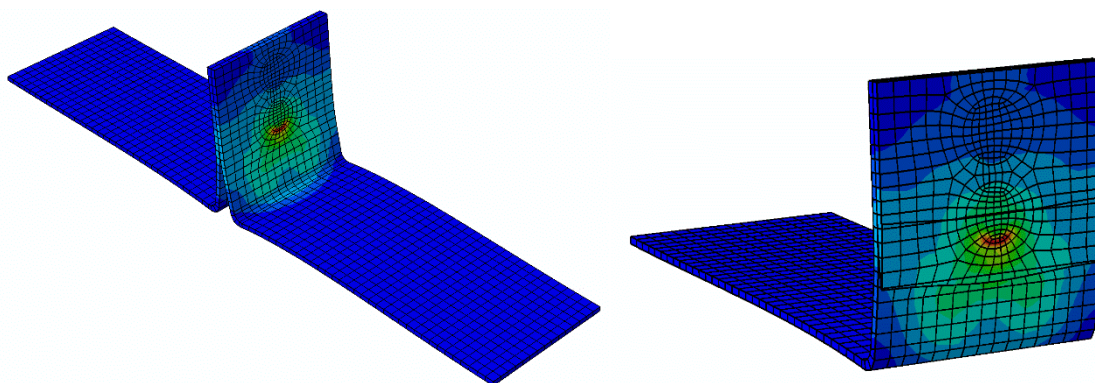


**Figure IV.12:** Échantillon avec 2 points soudés en parallèle avec un diamètre de 8 mm

---

**✓ Résultats de la simulation**

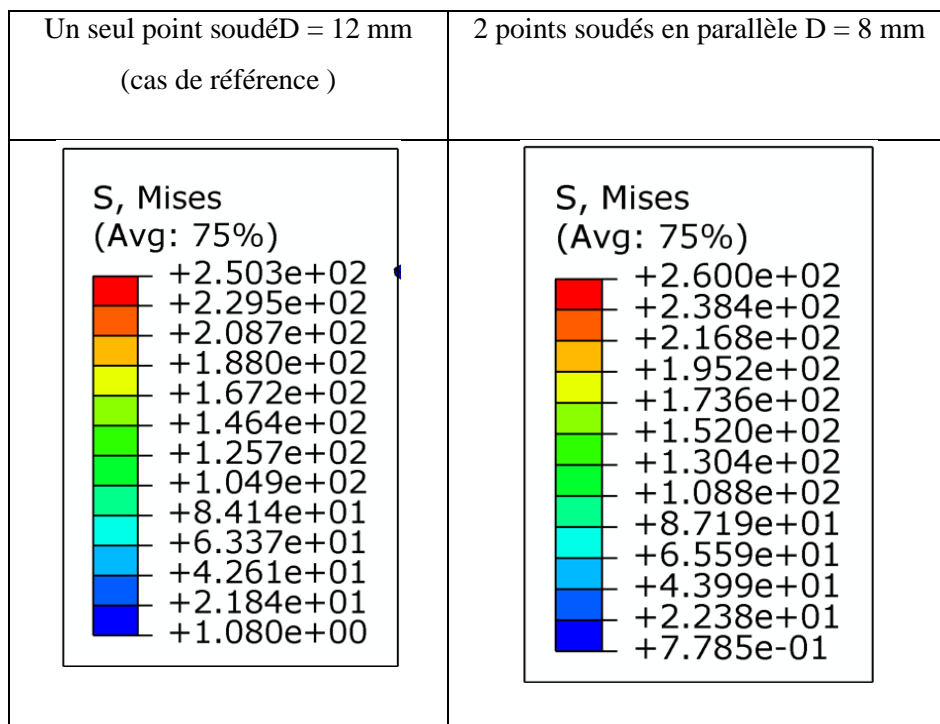
Les Figures IV.2 et IV.14 illustrent la distribution des contraintes de Von Mises pour les deux configurations étudiées : une configuration avec un seul point de soudure de diamètre 12 mm (cas de référence), et une autre avec deux points de soudure parallèles, chacun ayant un diamètre de 8 mm.



**Figure IV.14:** Contraintes de Von Mises pour deux points de soudure parallèles de diamètre 8 mm

- ❖ Dans le cas de référence (un seul point de soudure), une concentration élevée des contraintes au niveau du point de soudure, avec une contrainte maximale représentée en rouge. Des contraintes modérées, indiquées en vert, apparaissent également dans la partie inférieure allongée de l'éprouvette ainsi qu'au niveau du point de soudure. Le reste de l'éprouvette présente des contraintes faibles ou nulles, représentées en bleu.
- ❖ Dans la configuration avec deux points en parallèle, la concentration maximale des contraintes est localisée au niveau du point de soudure inférieur, également représentée en rouge. Des contraintes modérées sont visibles en vert dans la zone située autour et en dessous de ce point. Le reste de l'éprouvette demeure faiblement sollicité, avec des contraintes nulles ou très faibles, représentées en bleu.

**Tableau IV.15:** Valeurs de Von Mises simulées sous ABAQUS pour un point de soudure (D = 12 mm, cas de référence) et deux points de soudure parallèles (D = 8 mm chacun)



**Tableau IV.16:** Valeurs des contraintes maximales et minimales pour un point de soudure (D = 12 mm, cas de référence) et deux points de soudure parallèles (D = 8 mm chacun)

Configuration	Contrainte max (MPa)	Contrainte min (MPa)
1 point (D = 12 mm, Réf.)	2.503 e+02	1.08 e+00
2 points parallèles (D = 8 mm)	2.600 e+02	7.785 e-01

❖ À partir du Tableau IV.15 et IV.16 La contrainte maximale est légèrement plus élevée pour la configuration à 2 points parallèles (D=8 mm) avec 260,0 MPa par rapport à la configuration à 1 point (D=12 mm), qui a une contrainte maximale de 250,3 MPa. Cela suggère que la configuration à 2 points parallèles est légèrement plus résistante. En revanche, la contrainte minimale est plus faible dans la configuration à 2 points parallèles, avec 0,7785 MPa contre 1,08 MPa pour la configuration à 1 point, ce qui indique que la configuration à 2 points parallèles est moins rigide sous des charges minimales.

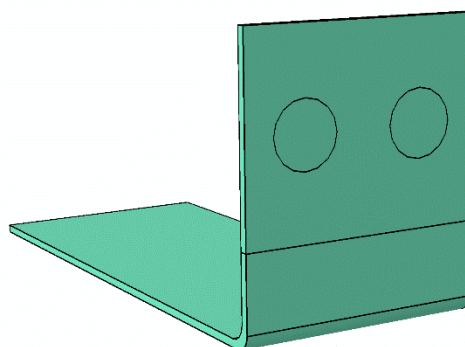
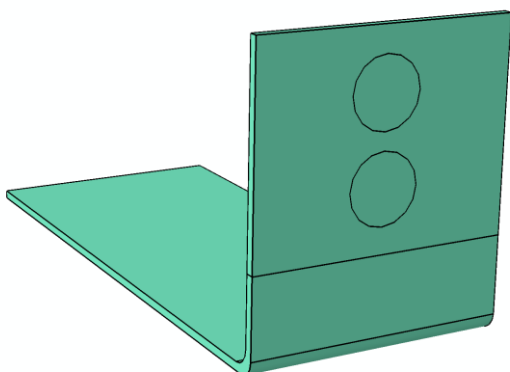
### IV.5.6 Influence du positionnement des points de soudure

Dans cette partie, nous analysons l'effet du positionnement des points de soudure sur la distribution des contraintes de Von Mises. Deux configurations sont considérées :

**Disposition parallèle :** deux points de soudure alignés horizontalement, chacun de diamètre 8 mm. (Voir Figure IV.16)

**Disposition en série :** deux points de soudure alignés verticalement, également de diamètre 8 mm. (Voir Figure IV.15)

L'objectif est de comparer le comportement mécanique de ces deux agencements afin d'évaluer l'impact du positionnement sur la répartition des contraintes dans l'assemblage soudé.

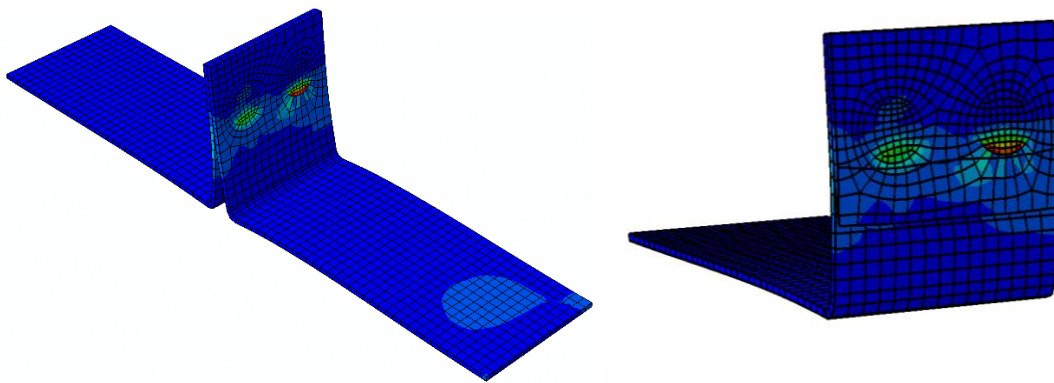


**Figure IV.16:** Échantillon avec 2 points soudés en parallèle avec un diamètre de 8 mm

**Figure IV.15:** Échantillon avec 2 points soudés en série avec un diamètre de 8 mm

#### ✓ Résultats de la simulation

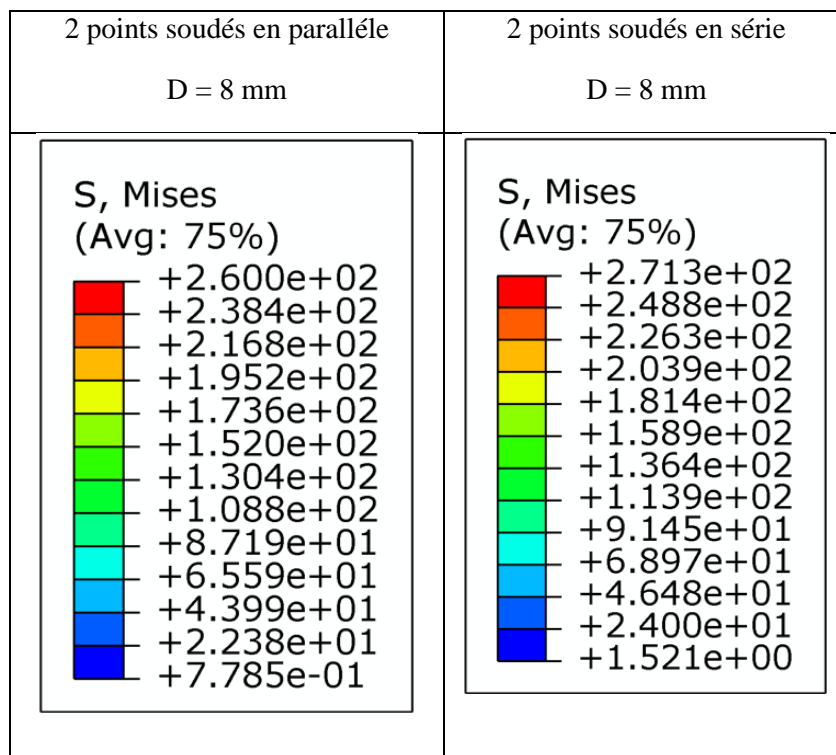
Les Figures IV.17 et IV.14 présentent la distribution des contraintes de Von Mises pour les deux configurations étudiées : une avec des points de soudure disposés en parallèle et l'autre avec des points de soudure disposés en série, chaque point ayant un diamètre de 8 mm.



**Figure IV.17:** Contraintes de Von Mises pour deux points de soudure en série de diamètre 8 mm

- ❖ Dans la configuration en série, la concentration des contraintes est plus prononcée au niveau du point de soudure situé à droite, où la contrainte maximale est représentée en rouge. Des contraintes modérées, indiquées en vert, apparaissent également dans la partie inférieure autour des deux points de soudure. Le reste de l'éprouvette présente des contraintes faibles ou nulles, représentées en bleu.
- ❖ Dans la configuration en parallèle, la concentration maximale des contraintes est localisée au niveau du point de soudure inférieur, également représentée en rouge. Des contraintes modérées sont observées en vert dans la zone inférieure autour de ce point de soudure, notamment en dessous. Le reste de l'éprouvette reste faiblement sollicité, avec des contraintes nulles ou très faibles, représentées en bleu.

**Tableau IV.17:** Valeurs de Von Mises simulées sous ABAQUS pour deux points de soudure en série et en parallèle (D = 8 mm chacun)



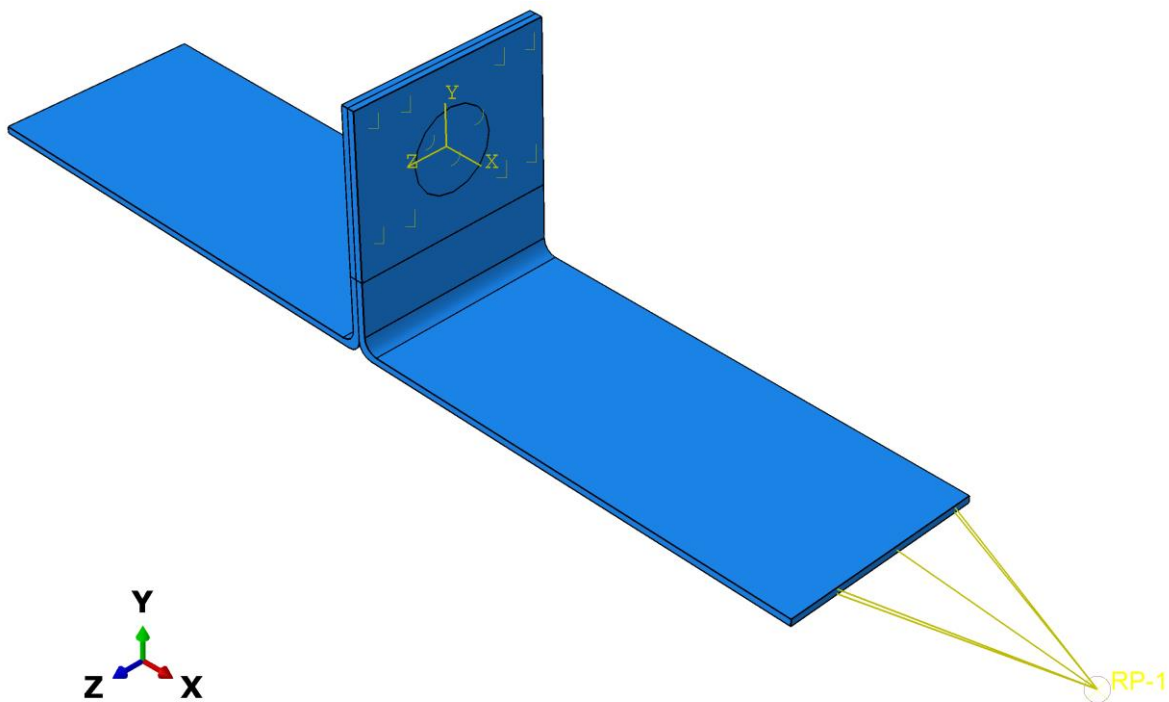
**Tableau IV.18:** Valeurs des contraintes maximales et minimales pour deux points de soudure en série et en parallèle (D = 8 mm chacun)

Configuration	Contrainte max (MPa)	Contrainte min (MPa)
2 points en parallèle (D=8 mm)	2.600 e+02	7.785 e-01
2 points en série (D=8 mm)	2.713 e+02	1.521 e+00

❖ a partir du Tableau IV.17 et IV.18 La contrainte maximale est légèrement plus élevée pour la configuration à 2 points en série (D=8 mm), avec 271,3 MPa, par rapport à la configuration à 2 points en parallèle (D=8 mm), qui a une contrainte maximale de 260,0 MPa. Cela indique que la configuration en série est plus résistante aux charges importantes. En revanche, la contrainte minimale est plus élevée dans la configuration à 2 points en série, avec 1,521 MPa, contre 0,7785 MPa pour la configuration à 2 points en parallèle, suggérant que la configuration en série est plus rigide sous des charges minimales.

### IV.5.7 Influence de la surface d'application de la charge de traction

Dans cette partie, nous analysons l'impact de la surface d'application de la charge de traction (1 mm) sur le comportement mécanique de l'assemblage acier-acier (DC03), avec une surface d'application de charge définie, est comparé à des configurations où cette surface est modifiée. L'objectif est de comprendre comment la variation de la surface d'application influence la répartition des contraintes et des déplacements, notamment au niveau des points de soudure et des zones critiques de la structure.



**Figure IV.18:** Surface (verticale) d'application de la force de traction sur l'assemblage acier-acier

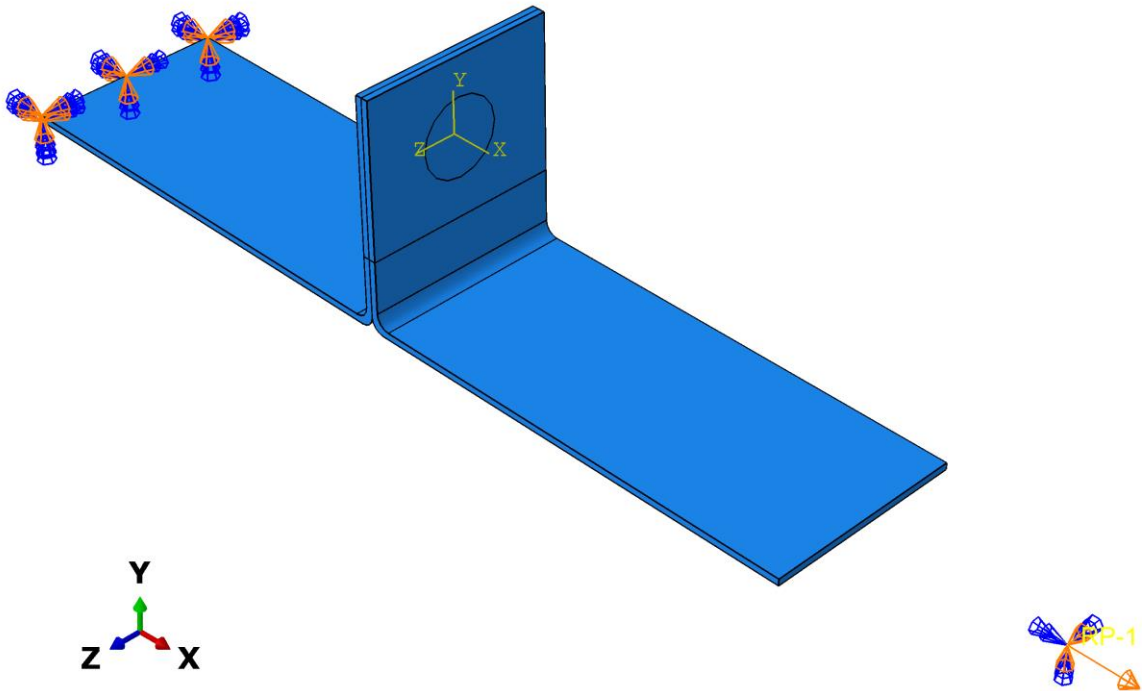


Figure IV.19: Application de la charge de traction sur la surface verticale de l'éprouvette

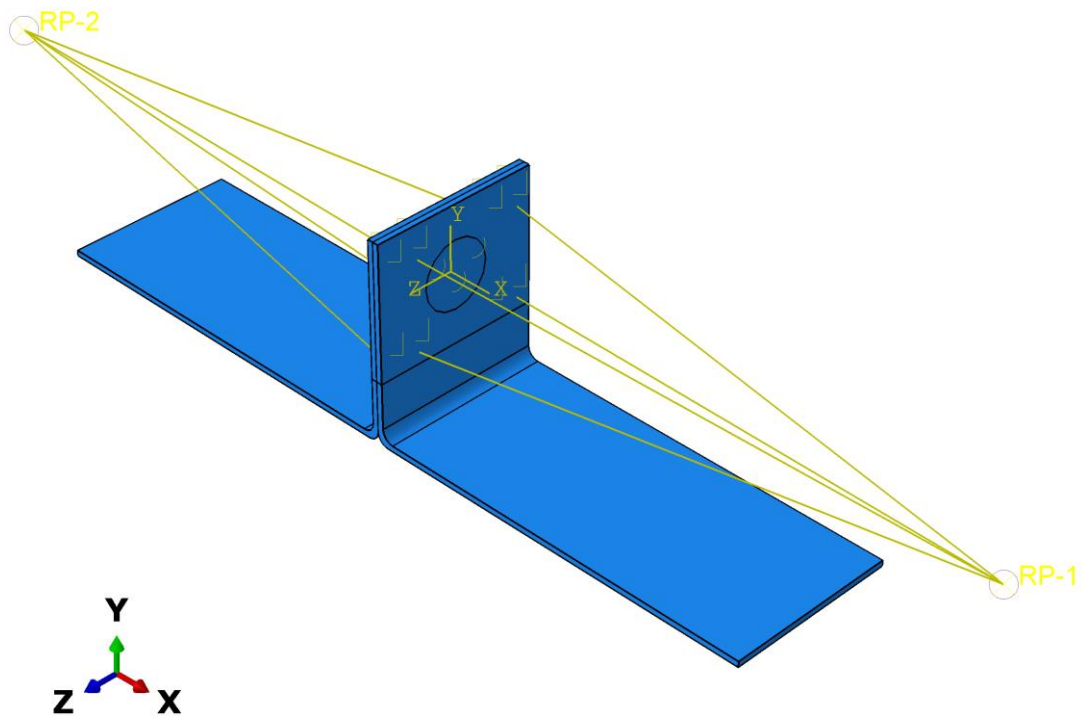
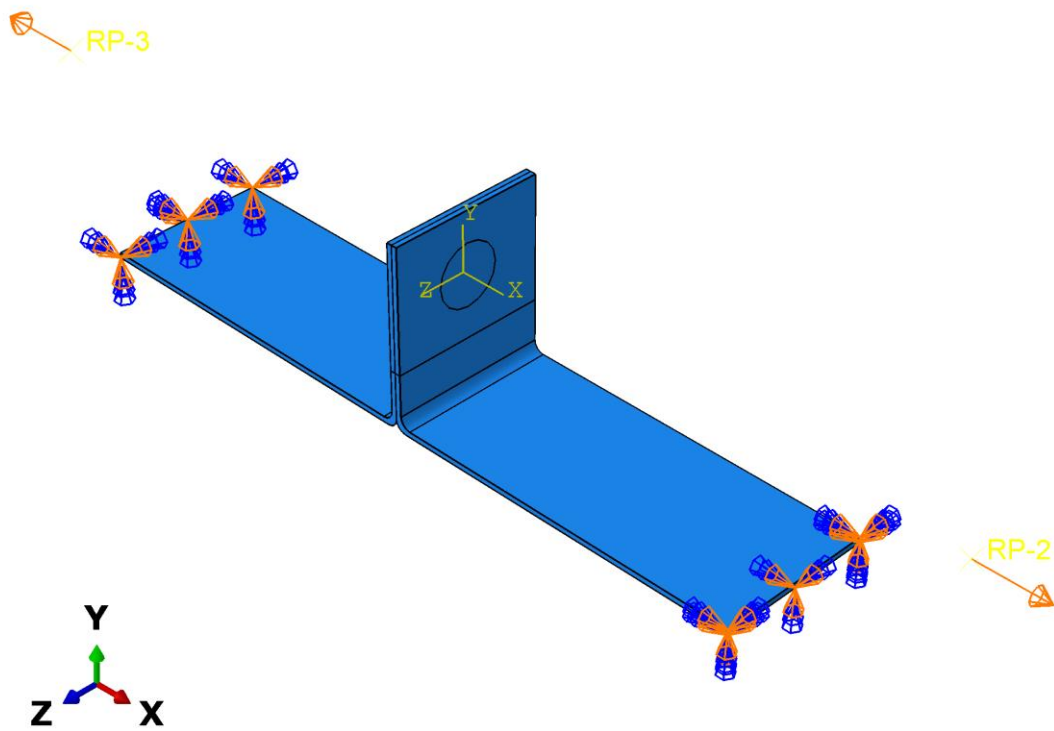


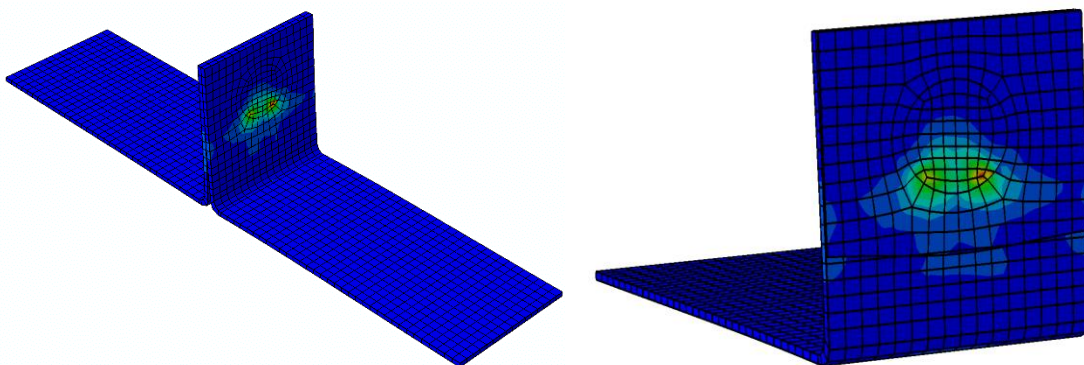
Figure IV.20: Surface (horizontale) d'application de la force de traction sur l'assemblage acier-acier



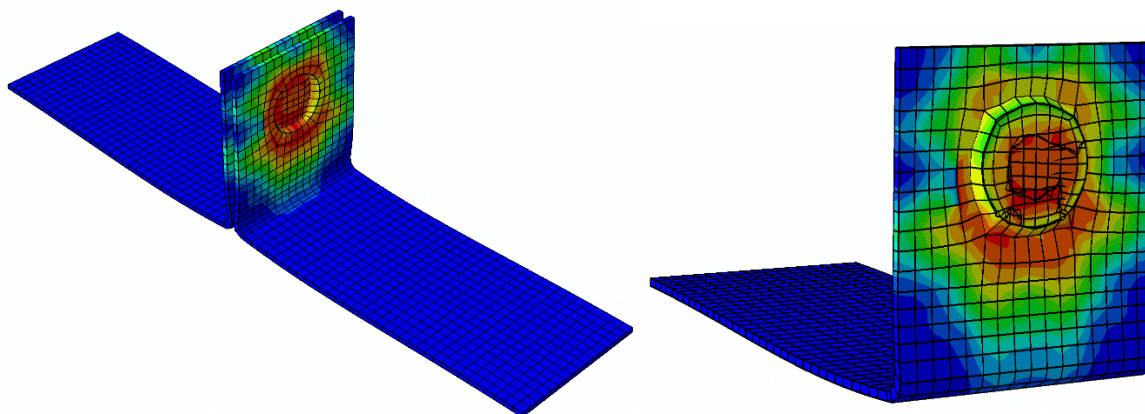
**Figure IV.21:** Application de la charge de traction sur la surface horizontale de l'éprouvette

✓ **Résultats de la simulation**

Les Figures IV.22 et IV.23 illustrent la distribution des contraintes de Von Mises pour les différentes configurations de surface de traction étudiées.



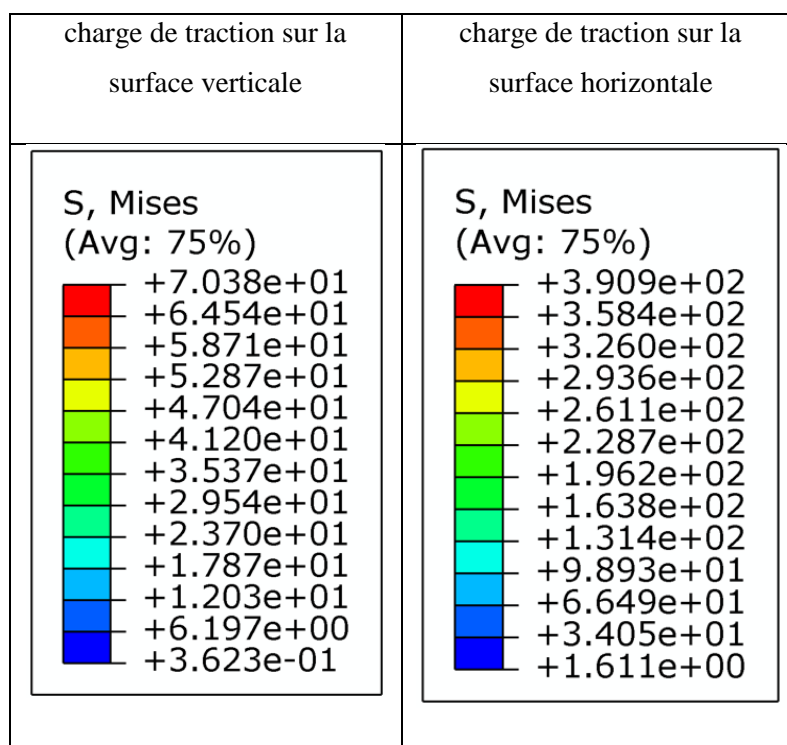
**Figure IV.22:** Contraintes de Von Mises pour l'application de la charge de traction sur la surface verticale pour  $c = 1$  mm



**Figure IV.23:** Contraintes de Von Mises pour l'application de la charge de traction sur la surface horizontale pour  $c = 1$  mm

- ❖ Lorsque la charge de traction est appliquée sur la surface verticale, une petite zone rouge apparaît au niveau du point de soudure, indiquant une contrainte maximale localisée. On observe également une petite zone verte autour du point de soudure, traduisant des contraintes modérées. Le reste de l'éprouvette présente des contraintes faibles ou nulles, représentées en bleu.
- ❖ En revanche, lorsque la charge est appliquée sur la surface horizontale, l'ensemble du point de soudure et sa zone périphérique apparaissent en rouge, ce qui traduit des contraintes beaucoup plus élevées et plus largement réparties. La partie verticale de l'éprouvette montre quant à elle des contraintes modérées, en vert, tandis que le reste de l'éprouvette reste faiblement sollicité, en bleu.

**Tableau IV.19:** Valeurs de Von Mises : surface verticale vs horizontale pour  $c = 1$  mm



**Tableau IV.20:** Valeurs des contraintes maximales et minimales : surface verticale vs horizontale pour  $c = 1$  mm

Surface de charge	Contrainte max (MPa)	Contrainte min (MPa)
Verticale (Réf.)	7.038 e+01	3.623e-01
Horizontale	3.909 e+02	1.611 e+00

❖ À partir du Tableau IV.19 et IV.20 La contrainte maximale est beaucoup plus élevée pour la surface de charge horizontale, avec 390,9 MPa, comparée à la surface de charge verticale, qui a une contrainte maximale de 70,38 MPa. Cela indique que la surface horizontale peut supporter des charges beaucoup plus importantes. En revanche, la contrainte minimale est également plus élevée pour la surface horizontale (1,611 MPa) par rapport à la verticale (0,3623 MPa), ce qui suggère que la surface horizontale est plus rigide sous des charges minimales.

## **IV.6 Conclusion**

Les simulations numériques réalisées sur un assemblage acier-acier (DC03) ont permis d'étudier l'influence de plusieurs paramètres sur le comportement mécanique, notamment l'épaisseur des pièces, le nombre et le positionnement des points de soudure, la charge de traction, le diamètre des points de soudure, et la surface d'application de la charge.

- ✓ L'assemblage acier-acier présente la contrainte maximale la plus élevée, tandis que cuivre-cuivre montre une faible capacité à supporter des charges élevées.
- ✓ L'augmentation de la charge conduit à une augmentation des contraintes maximales et à une redistribution plus large des contraintes dans l'éprouvette.
- ✓ Un diamètre plus grand réduit les contraintes maximales en améliorant la répartition des forces.
- ✓ L'augmentation de l'épaisseur accroît les contraintes maximales et la rigidité de l'assemblage.
- ✓ Plus de points de soudure améliorent la résistance, mais réduisent la flexibilité sous des charges faibles.
- ✓ Une configuration en série des points offre une meilleure résistance aux charges élevées, tandis que la disposition parallèle favorise une gestion des charges faibles.
- ✓ Appliquer la charge sur la surface horizontale génère des contraintes beaucoup plus élevées que sur la surface verticale.

## *Conclusion générale*

Le soudage par résistance par point est un procédé d'assemblage largement utilisé dans l'industrie, notamment dans le secteur automobile, en raison de sa rapidité, de sa simplicité d'automatisation et de l'absence de métal d'apport. Ce procédé repose sur l'application simultanée d'un courant électrique et d'une pression mécanique entre deux électrodes en alliage de cuivre, provoquant un échauffement localisé par effet Joule à l'interface des pièces superposées jusqu'à la formation d'un point de soudure.

Dans le cadre de cette étude, des **simulations numériques ont été réalisées sous le logiciel Abaqus**, afin d'analyser le comportement mécanique d'assemblages acier-acier (DC03) soumis à des chargements uniaxiaux. L'utilisation de cet outil de calcul par éléments finis a permis de visualiser la distribution des contraintes et d'évaluer l'influence de différents paramètres géométriques et de chargement sur la réponse des structures soudées.

- ❖ L'assemblage acier-acier présente la contrainte maximale la plus élevée, ce qui traduit une bonne capacité à supporter des charges importantes. À l'inverse, l'assemblage cuivre-cuivre montre une faible résistance mécanique.
- ❖ L'augmentation de la charge de traction entraîne une élévation des contraintes maximales et une redistribution plus large des contraintes dans l'éprouvette
- ❖ Un diamètre plus grand du point de soudure permet de réduire les contraintes maximales en améliorant la répartition des efforts mécaniques dans la structure.
- ❖ L'augmentation de l'épaisseur des pièces accentue la rigidité de l'assemblage, mais engendre également des contraintes maximales plus importantes.
- ❖ Un plus grand nombre de points de soudure améliore la résistance globale de l'assemblage, mais diminue sa flexibilité sous faibles charges.
- ❖ La configuration des points a un rôle déterminant : une disposition en série est plus efficace pour résister à des charges élevées, tandis qu'une disposition en parallèle gère mieux les sollicitations faibles.
- ❖ La direction de l'application de la charge influence fortement les contraintes générées : une charge appliquée horizontalement produit des contraintes nettement plus élevées qu'une charge verticale.

## *Conclusion générale*

---

Les performances mécaniques d'un assemblage soudé par points dépendent fortement de la géométrie, des matériaux, de la disposition des points et des conditions de chargement. **L'analyse par éléments finis avec Abaqus** permet d'identifier les zones critiques et d'optimiser la conception des assemblages dans une logique de fiabilité et de performance.

Sur le plan des perspectives, plusieurs axes de travail se dégagent pour approfondir et élargir les résultats obtenus. Tout d'abord, l'extension du modèle numérique aux sollicitations multiaxiales et dynamiques permettrait d'appréhender des conditions de chargement plus représentatives des situations réelles. Ensuite, l'intégration plus fine des transformations métallurgiques dans la zone affectée thermiquement, notamment par le couplage avec des modèles microstructuraux, constituerait une avancée significative pour la prédiction de la durée de vie en fatigue des assemblages. Enfin, l'application de cette méthodologie à d'autres nuances de matériaux, notamment les aciers à très haute résistance et les alliages d'aluminium, présenterait un intérêt majeur pour les industries automobile et aéronautique engagées dans des démarches d'allègement des structures.

***Références bibliographiques***

- [1] Module de formation de soudage par résistance: Article ADEL
- [2] Ferederique Rossillon. "Influence des conditions de soudage sur le comportement en fatigue d'un acier THR dual phase soudé par point". Thèse de Doctorat, Université balaise pascal. 2007
- [3] Sun S., Stephens E.V., Khaleel M.A. (2007). "Effect of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high strength steel spot weld. Welding Journal, vol. 88, pp 18-25.
- [4] Chainarong Srikunwong. "Modélisation du procède de soudage par point". Thèse de Doctorat, Ecole National des Mines de Paris, 2005
- [5] Soudage par résistance: SD SERVICE 2012
- [6] Ali Tavassolizadeh, Pirooz Marashi, Majid Pouranvari (2011). "Mechanical performance of three thickness resistance spot welded low carbon steel". Materials Science and Technology, 27(1), pp 219-224.
- [7] Zuraidah Salleh, Yakub Md Taib, Nik Rozlin Nik Mohd Masdek, Farizah AdlizaGhazali (2019). "Improvement of mechanical properties in treated spot welded joint". Materials Todays: Proceedings. Volume 16, Part 4, pp 1988-1993.
- [8] Majid Pouranvari (2011). "Effect of Fusion Zone Size on the Mechanical Response of DQSK Steel Resistance Spot Welds". Australian Journal of Basic and AppliedSciences 5(12), pp 573-577
- [9] Dancette S, Fabregue D., Merlin J., Massardier-Jourdan V. Bouzekri M. (2007). "Welding of advanced high strength steels: Study of the microstructures obtained and damage mechanism during cross tension test". Internal report 2007 7737 AUP
- [10] XingeZhang, FubinYao,ZhenanRen,HaiyanYu(2018). "Effect of welding current on weld formation, microstructure, and mechanical properties in resistance spot welding of CR590T/340Y galvanized dual phase steel". Materials (Basel). 11(11): 2310.
- [11] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). Materials science and engineering: An introduction (10th ed.). Wiley.
- [12] Mott, R. L. (2007). Applied strength of materials (5th ed.). CRC Press.
- [13] Jacques, A., & Morel, F. (2013). Résistance des matériaux (2e éd.). Dunod.

## *Références bibliographiques*

---

- [14] Géry, D., & Longère, P. (2015). Comportement mécanique des matériaux. Presses Polytechniques.
- [15] ISO 6506-1:2014 ; Callister & Rethwisch, 2018)
- [16] (ISO 6506-1:2014 ; ASTM E10 ; Ashby & Jones, 2012)
- [17] Callister & Rethwisch, 2018 ; Ashby & Jones, 2012)
- [18] <https://www.soudeurs.com/site/essais-mecaniques-les-essais-destructifs-des-soudures-par-resistance-par-points>
- [19] Julien Briche. Thermomécanique. Introduction à la CAO sur le logiciel ABAQUS.
- [20] GOUMGHAR Amirouche. Caractérisation expérimentale et simulation numérique du comportement mécanique de tubes renforcés soumis à un écrasement axial promotion 2016/2017
- [21] AIT TALEB Aissa. Modélisation du comportement de structures tubulaires traitées et non traitées. Mémoire de fin d'études 2017/2018
- [22] expérimental/numérique. Élaboré par Promotion 2015 / 2016.
- [23] Abaqus. Une brève introduction. ABAQUS/CAE 6.9.
- [24] [http://mdevmd.accesmad.org/mediatek/pluginfile.php/3759/mod\\_resource/content/1/03%20T action%20\(cours\).html](http://mdevmd.accesmad.org/mediatek/pluginfile.php/3759/mod_resource/content/1/03%20T%20action%20(cours).html) 12-09-2020
- [25] [<https://www.mecastyle.com/calcul-de-structure-elements-finis-methode>
- [26] MANDI OMAR. Étude de l'influence des paramètres de soudage par point sur les caractéristiques mécaniques des structures soudées Thèse de Master, 2018-2019, Université de Tlemcen
- [27] Rim Chtourou. Tenue mécanique des assemblages soudés par point multi-tôles et acier multigrades : étude expérimentale, modélisation macroscopique et procédure d'identification. Thèse de doctorat, 2017, Valenciennes