

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
التعليم

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
بلحاج بوشعيب لعين
Centre Universitaire BLHADJ Bouchaib d'Ain Témouchent

Institut : Sciences et Technologie
Département : Génie Mécanique



PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Domaine : Sciences et technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Mécanique et Energétique

Thème

Analyse thermomécanique au régime permanent des conduites à l'intersection

Présenté Par :

Mr. CHOUAT Soufiane

Devant le jury composé de :

Président	: Mr. ZIADI Abdelkader,	Pr,	CUBBAT
Encadrant	: Mr BELHAMIANI Mohamed,	MCB,	CUBBAT
Examineur	: Mr BELOUFA Mohamed,	MCB,	CUBBAT

Promotion : Juin 2015

REMERCIEMENT

Je voudrais en premier lieu remercier chaleureusement mon directeur de mémoire de Master Monsieur BELHAMIANI Mohamed, qui a suivi et a encadré ce travail avec intérêt et disponibilité. Je le remercie aussi de m'avoir initié avec autant de talents à ce travail de recherche, aussi pour ses directions scientifiques, ses qualités pédagogiques, Je tiens particulièrement à remercier vivement le Professeur A. ZIADI pour tous les efforts, et de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire. Je tiens aussi à remercier Dr. M. BELOUFA pour avoir accepté à évaluer ce travail. Je n'oublie pas aussi de remercier tous les enseignants qui ont participé à ma formation durant toutes mes études universitaires.

Je tiens aussi à remercier spécialement Mr BENZGHIR Nouredine le responsable de bureau du GRTG (Ain Témouchent), et tout l'équipe de GRTG, ainsi que le chef de département de génie mécanique à l'institut des sciences et de la technologie Dr B. BENSAAD.





Dédicaces

*Je dédie cet humble travail :
A ma mère et mon père qui
leur dévouement et leur
affection ont été pour moi un
soutiens tout au long mes
étude et de ma vie.*

A ma tante

*A ma sœur et mes frères et
toute ma famille.*

A tous mes amis.



Résumé:

Cette étude porte principalement l'étude en comportement des jonctions sous l'effet de la pression interne et de la variation de la température.

Les jonctions étudiées sont de type T-jonction. Le but étant de calculer les champs de contraintes couplés à la variation de la température. Ce couplage définit de façon réaliste le comportement thermomécanique de la jonction et notamment à l'intersection où on constate des concentrations importantes de contraintes. La jonction est un élément très utilisé dans les installations industrielles tel que les circuits de refroidissement des centrales nucléaires qui sont soumis à des fluctuations de température dues au mélange des fluides chaud et froid c'est ce qu'on appelle les zones de mélange. Ces fluctuations peuvent engendrer par fatigue thermique ou mécanique des endommagements et fissurations dans les circuits causant des fuites. La modélisation numérique est réalisée sur le code de calcul « ABAQUS » se basant sur la méthode des éléments finis.

Mot clés: Tube en acier, Corrosion, Pression interne, contrainte thermique, Simulation numérique.

Abstract:

This study focuses on the behavior of junctions in effect of internal pressure and temperature variation. The main junctions are studied with the T junction. The goal is to calculate the stress fields coupled to the temperature change. This coupling defines a realistic thermo-mechanical behavior of the junctions, including the intersection where there is a large concentration of stress. The junction is an element widely used in industrial installations such as cooling circuits of nuclear power plants are subjected to temperature fluctuations due to the mixing of hot and cold fluids is the so-called mixing zones. These fluctuations can cause thermal fatigue and mechanical damage and cracks in the circuit causing leaks. Numerical modeling is performed on the computer code « ABAQUS » based on the finite element method.

Key words: steel pipe, Corrosion, Internal pressure, Stress Thermal, Numerical Simulation.

تتركز هذه الدراسة على طبيعة مختلف التقاطعات تحت تأثير الضغط الداخلي و درجات الحرارة المختلفة الرئيسية المدروسة من نوع تقاطع T. و الهدف هو حساب حقول أو توزع الاجهادات مقترنة بتغير درجة الحرارة . هذا الاقتران يحدد بشكل واقعي طبيعة أو محتوى الحرارة الميكانيكية للتقاطع و لا سيما على مفترق الطرق حيث هناك تركيز كبير من الاجهادات.التقاطع عنصر يستخدم على نطاق واسع في المنشآت الصناعية مثل دوائر التبريد في محطات الـ النووية التي تخضع لتقلبات درجات الحرارة بسبب اختلاط السوائل الساخنة و الباردة فيما يسمى بمناطق الخلط. ويمكن لهذه التـ عب الحراري أو الميكانيكي أن تسبب الأضرار و اشقوق في الدوائر مما يسبب البطريقةالعنصر . . يتم تنفيذ النمذجة العددية على «ABAQUS»

الكلمات المفتاحية: للضغط الداخلي, المحاكات الرقمية,العراقيل الحرارية, الصدأ.

liste des figures

figures	pages
Figure I.1: Gradient de température	2
Figure I.2 : Transfert de chaleur par conduction sur l'axe Ox	4
Figure I.3 : Exemple de Transfert de chaleur par conduction	5
Figure I.4: coefficient de transfert de chaleur par convection h	8
Figure I.5 : convection naturel	8
Figure I.6: les zones de convection naturelle	9
Figure I.7 Transfert de chaleur par convection	11
Figure I.8: régime laminaire	12
Figure I.9: régime turbulent	13
Figure I.10: calcul de la déformation thermique	14
Figure II.1: Schématisation de l'essai de traction-compression	21
Figure II.2: Schématisation de l'essai de compression	21
Figure II.3: Schématisation de l'essai de torsion	21
Figure II.4: Schématisation de l'essai de flexion quatre points	21
Figure II.5: Essais d'écroutissage en traction	22
Figure II.6: Représentation schématique d'une courbe de fluage	23
Figure II.7: Représentation schématique d'un essai de relaxation	23
Figure II.8: Tube en PE sous flexion	25
Figure II.9 : Système statique pour la pression interne, tube en coupe	26
Figure II.10: Tube exposé à la pression interne	27
Figure II-11 : un pipeline infect par la corrosion	31

Figure II-12: La corrosion due au recouvrement sur les joints.	32
Figure II-13 : Corrosion due aux infiltrations et parties saillantes (cordons de soudure)	32
Figure II-14 : L'osmose une année après	32
Figure II-15 : l'explication chimique de corrosion	32
Figure II-16 : Bande STOPAQ CSZ	33
Figure II-17: Mastic STOPAQ CSZ	33
Figure II-18 : les opérations nécessaire pour élimine la corrosin	33
Figure II-19: Diagramme de Pourbaix pour le fer	35
Figure II-20 : Protection cathodique d'un métal par couplage galvanique	35
Figure II-21 : Corrosion due aux infiltrations et parties saillantes (cordons de soudure)	36
Figure II-22: TUBE POLYÉTHYLÈNE EAU POTABLE	36
Figure II-23 : ANODE PRÉBACKFILLÉE	37
Figure II-24: ANODE SACRIFICIELL	37
Figure II-25: Poste de soutirage (Un système actif et économique)	37
Figure II-26: DRAINAGE COURANTS VAGABONDS	38
Figure II-27: POINT DE MESURE	38
Figure II-28: ELECTRODE	38
Figure II-29: circuit de soudage (fiche pratique de sécurité, Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées) INRS ED 83	39
Figure II-30 : Du sommet du tuyau, les deux têtes tandem doubles soudent le pipeline de diamètre 1321 mm jusqu'au « point de rendez-vous » inférieur	40
Figure II-31 : Procédé Saturne équipé de 8 torches	40
Figure II-32 : Coupes macroscopiques des soudures de SERIMAX et du WERC	41

Figure II-33 : Résilience des soudures de raboutage entaillées dans le métal fondu (W) ou en ligne de fusion (FL) d'une soudure Bitorche, (FL) d'une soudure Bitorche	41
Figure II-34 : Présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé	42
Figure II-35 : Procédé de soudage automatique MAG Bitorche (Saturnax®), photo : D. Rollot, SERIMAX	44
Figure II-36 : Allure des 6 soudures de raboutage coupe LS et notations en gras	44
Figure II-37: Coupe macroscopique de la soudure de raboutage	45
Figure II-38: Soudures du gazoduc et notations	45
Figure II-39: Vue macroscopique d'une coupe de la soudure longitudinale, polie et attaquée Nital	45
Figure II-40: Dureté partant du centre de la soudure longitudinale W(L) en direction de la ZAT, en interne et en externe	46
Figure II-41 : Empreintes de dureté dans la soudure en T (plan LS), macrographie + tendance 3D	46
Figure II-42: Mesures de température en conditions réelles de soudage (bitorche, bride <i>interne en cuivre</i>)	47
Figure II-43 : Enregistrement près de la peau interne lors des 4 passages du chariot bitorche	47
Figure II-44 : Définition du système de coordonnées, où une source de chaleur se déplace à une vitesse constante	48
Figure II-45 : L'équation (II-21) de Rykiline ajustée sur la température mesurée à 1.5 mm de FL	49
Figure II-46 : Température maximale de pic en fonction de la distance à la ligne de fusion pour un tube en acier à haute limite d'élasticité, issu des acquisitions sur cycles réels	50
Figure II-47 : Simulateur thermomécanique Gleeble et son rack de contrôle et d'acquisition	51

Figure II-48 : Asservissement en température et en charge (Alain NASLOT)	51
Figure II.49 : Zone d'inflammation (Z.I.)	52
	54
FigureII-50 : la température d d'auto-inflammation	
FigureII-51 : Ioniflam	55
FigureII-52 : explosimètre	55
FIGURE II.53 : des accidents réels en kanada	56
Figure III-1 Géométrie en T jonction	57
Figure III-2 Les conditions aux limites appliquées sur ABAQUS	58
Figure III-3 a) éléments tétraédrique, b) éléments hexaédrique	59
Figure III-4 Maillage de la jonction T sous ABAQUS	60
Figure III-6 Distribution de la déformation sur T-jonction en Al suivant les axes x, y et z	61
Figure III-7 Variation de la contrainte en T-jonction en Al suivant les axes x, y et z	61
Figure III-8 Variation de la déformation en T-jonction en Al suivant les axes x, y et z	61
Figure III-9 Distribution de la déformation sur T-jonction en 304L suivant les axes x, y et z	62
Figure III-10 Variation de la contrainte en T-jonction en 304L suivant les axes x, y et z	63
Figure III-11 Distribution nodale de la température pour une jonction T en Al	63
Figure III-12 Variation de la température en fonction de la distance	64
<i>Figure III-13 contour de la température, a) jonction en 304L, b) jonction en Al</i>	64

Liste des tableaux

Tableaux	Pages
Tableau I.1 : conductivités de quelques matériaux	05
Tableau I.2 : propriété de l'air	06
Tableau I.3 : propriété de l'eau	07
Tableau I.4 : coefficient d'échange pour l'air en convection naturelle régime laminaire)	10
Tableau I.5 : coefficient de dilatation linéaire de quelques matériaux	16
Tableau II-1: Six tubes soudés Elgamatic 135 (dimension, côté de prélèvement, placement torches)	29
Tableau II-2 : Microstructures de la jonction des 2 soudures : longitudinale L et raboutage T	43
Tableau II-3: Paramètres ajustés pour l'équation de Rykaline (II-21)	50
Tableau III.1 :Propriétés physique d' aluminium à différentes température	56
Tableau III.2 : Propriétés physique de l'acier inoxydable 304 L à différentes température	57

Table de Matieres

INTRODUCTION GENERALE	01
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE TRANSFERT THERMIQUE	
I.1) Généralités sur le transport et le transfert de l'énergie thermique.....	03
I.2). Définitions	03
I.2.a). Champ de température	03
I.2.b). Gradient de température	04
I.2.c). Flux de chaleur	04
I.3). transfert de chaleur par conduction	06
I.3.a) Propriété de matériaux	07
I.3.b) Propriété des fluides	08
I.4) transfert de chaleur par convection	09
I.4.1) Convection sans changement d'état	10
I.4.1.a) Convection naturelle et forcée	10
I.5) Régime d'écoulement	14
I.5.a)- En régime laminaire	14
I.5.b) -En régime turbulent	15
I.6) Expression du flux de chaleur	15
I.7) Calcul de la déformation thermique	16
I.7.a) Coefficients de dilatation thermique (cas isotrope)	17
I.7.b) Tenseur de dilatation thermique	17
CHAPITRE II : LES SOLLICITATION ET CONTRAINTES APPLIQUEES AUX PIPELEENES	
II-1) Introduction	19
II-2) Direction de sollicitation	20
II.2.1) Les essais mécaniques.....	20
II.2.2) Essais monotones	22
II-3) Les contraintes appliquées au pipeline	23
II.3.1) Cas mécanique	24

Table de Matieres

A- Contrainte de flexion	24
B- Pression interne	26
C- Coup de bélier	28
II-3.2) Contraintes résiduelles due au soudage	28
II-4) Plan d'Intervention sur Gazoducs en Exploitation	29
II.5) Les facteurs de risques	30
II.5.1) Les facteurs de risques internes	30
II. 5.2) Les Facteurs de risques externes (subis par l'ouvrage durant l'exploitation)	31
1- Risques liés à l'environnement naturel	31
2- Risque de rupture : Risques liés aux activités extérieures à l'ouvrage	31
II.6) Les moyens de protection	32
II.6.1) La protection passive	32
II.6.2) La protection cathodique (la protection active)	33
II.7) La protection active	34
II.7.1) Type de la protection cathodique	35
II.7.2) Le soutirage de courant	37
II.8) Le soudage	38
II.8.1) Les types de soudage	39
II.9) La formation de la zone affectée thermiquement (ZAT)	41
II.9.1) Le cas du soudage monopasse	41
II.9.2) Le cas du soudage multipasse	42
II.10) Les six assemblages et leur soudage	43
II.10.1) Matériaux et choix	43
II.11) La ZAT de la soudure longitudinale W(L)	45
II.11.1) La ZAT de la soudure en T – tube 2B50	46
II.11.2) Exploitation des relevés de températures	46
II.11.3) Calcul de la température en un point de la soudure	50
II.12) Les Risques dus au gaz	52
II.12.1) Prévention des dangers	52
II.12.2) Explosion et détection des risques d'explosion	53

Table de Matieres

II.12.3) Appareils de détection des gaz	54
II.12.4) Quelque accident réel	55
CHAPITRE III : ETUDE NUMIRIQUE D'UN MODELE CONDUITE AVEC INTERSECTION	
III.1) Présentation du modèle étudié	57
III.2) Présentation du code de calcul	58
III.3) Les Conditions initiales et Les conditions aux limites	59
III.4) Résultat et discussion	61
a) Cas de chargement mécanique	61
b) Cas de chargement Thermique	64
Conclusion générale	67
Référence Bébiographie	68

Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

Le couplage thermomécanique dans la défaillance des matériaux a attiré un grand d'intérêt expérimental et théorique ces dernières années. La plupart de ces études traitent la variation du taux de déformation élastique, la rupture dynamique, et la fatigue thermique des circuits de refroidissement, où les taux de chargement extrêmes peuvent être à la base de l'adoucissement thermique du matériau à cause des températures assez élevées. Dans de tels problèmes, la prise en compte du couplage thermomécanique est essentielle pour comprendre les mécanismes de défaillance.

Les possibilités offertes d'augmenter la capacité de transport des gazoducs, par l'élévation de la pression de service et des diamètres des conduites de transport de gaz naturel ne sont pas encore utilisées de nos jours de manière assez importante, alors que les tendances mondiales dans ce domaine prévoient leur augmentation. Le passage à des pressions de service élevées nécessite l'amélioration des propriétés mécaniques des aciers de ces derniers, de manière à réduire les épaisseurs des parois des tubes destinés à la construction des gazoducs.

En d'autres termes, la qualité des gazoducs de grand débit dépend du choix de la meilleure combinaison entre les propriétés thermique et mécanique des tubes, à savoir la résistance et la ténacité. La qualité d'un gazoduc est une question primordiale pour les projets de transport du gaz naturel par canalisation.

Les valeurs des charges extérieures sollicitant la conduite et sa capacité portante ont un caractère aléatoire qu'on exprime par certaines fonctions de distributions. En effet, la conduite est conçue d'un nombre fini de tubes, dont les caractéristiques géométriques et de résistance diffèrent de manière aléatoire suite aux imperfections résultant des processus technologiques de fabrication des tôles et des tubes. Les facteurs qui influent de manière prépondérante sur le comportement des tubes dans une canalisation sont les agressions externes et les contraintes internes liées aux conditions d'exploitation.

Les tubes sont aussi susceptibles d'être attaqués par un phénomène de corrosion interne et externe, de fissuration ou bien de faille de fabrication. La corrosion interne et externe sont la cause principale de fuites et de ruptures des canalisations, se traduisant parfois par des dégâts catastrophiques (dégâts humains, pollution du milieu naturel, frais supplémentaires de réparation, arrêt prolongé du pompage, etc.). Si un pipeline porteur d'eau est affecté d'un éclatement de fuite, au moins cela ne nuit pas à l'environnement. Cependant, si c'est la fuite de pipeline est de pétrole ou chimique, cela peut être un désastre environnemental.

Les facteurs qui influent de manière prépondérante sur le comportement des tubes dans une canalisation sont les agressions externes et les contraintes internes liées aux conditions d'exploitation. L'objectif de ce travail est de présenter les défauts des canalisations, tout en présentant les outils pour leur traitement, par l'amélioration des caractéristiques de résistance des matériaux. Notre travail portera surtout sur le calcul des défauts de corrosion, sur les propriétés mécaniques, ainsi que la détermination des taux d'endommagement des tubes soumis des différentes pressions internes.

Chapitre I : généralités sur

le transfert thermique

I.1) Généralités sur le transport et le transfert de l'énergie thermique

De tous temps, les problèmes de transmission d'énergie, et en particulier de la chaleur, ont eu une importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, les évaporateurs, les condenseurs, etc., mais aussi pour des opérations de transformations chimiques.

En effet, dans certains systèmes réactionnels, c'est la vitesse des échanges de chaleur et non la vitesse des réactions chimiques qui détermine le coût de l'opération (cas de réactions fortement endo- ou exothermique). En outre, de nos jours, par suite de l'accroissement relatif du prix de revient de l'énergie, on recherche dans tous les cas à obtenir le rendement maximal d'une installation pour une dépense d'énergie minimale.

Les problèmes de transfert de chaleur sont nombreux, et on peut essayer de les différencier par les buts poursuivis dont les principaux sont :

- l'augmentation de l'énergie transmise ou absorbée par une surface,
- l'obtention du meilleur rendement d'une source de chaleur,
- la réduction ou l'augmentation du passage d'un débit de chaleur d'un milieu à un autre.

Le potentiel qui provoque le transport et le transfert de l'énergie thermique est la température. Si deux points matériels placés dans un milieu thermiquement isolé sont à la même température, on peut affirmer qu'il n'existe aucun échange thermique global entre ces deux points dits en équilibre thermique (il s'agit bien d'un équilibre thermique car chacun des points matériels émet une énergie thermique nette de même module, mais de signe opposé). [01]

I.2). Définitions

I.2.a). Champ de température

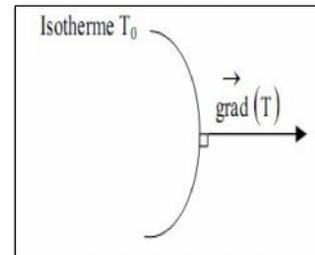
Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température $T = f(x, y, z, t)$. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas :

- ✓ Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- ✓ Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou instationnaire.

I.2.b). Gradient de température

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température :

$$\vec{i}(T) = \vec{i} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (I.1)$$



Avec :

\vec{n} : Vecteur unitaire de la normale

$\frac{\partial T}{\partial n}$: Dérivée de la température le long de la normale

Figure I.1: Gradient de température [01]

I.2.c). Flux de chaleur

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur :

$$\phi = \frac{1}{s} \frac{dQ}{dt} \quad (I.2)$$

Le transfert de chaleur au sein d'une phase ou, plus généralement, entre deux phases, se fait de trois façons :

I.2.d). les modes de transfert thermique

a) Par conduction :

Ce transport de chaleur se produit au sein d'une même phase - au repos ou mobile, mais tranquille (absence de remous) - en présence d'un gradient de température. Le transfert de chaleur résulte d'un transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre molécule adjacente. Ce mode de transfert est le seul à exister dans un solide opaque. Pour les solides transparents, une partie de l'énergie peut être transmise par rayonnement. Avec les fluides que sont les gaz et les liquides, la convection et le rayonnement peuvent se superposer à la conduction.

b) Par convection : Le transfert de chaleur par convection se produit entre deux phases dont l'une est généralement au repos et l'autre en mouvement en présence d'un gradient de température. Par suite de l'existence du transfert de chaleur d'une phase à l'autre, il existe dans la phase mobile des fractions du fluide (ou agrégats) ayant des températures différentes. Le mouvement du fluide peut résulter de la différence de masse volumique due aux différences de températures (on parle alors de convection libre ou naturelle) ou à des moyens purement mécaniques (on parle alors de convection forcée). Lorsqu'un fluide est en écoulement, une partie du transfert de chaleur dans le fluide se fait également par conduction et, dans le cas d'un fluide transparent, un transfert de chaleur par rayonnement peut accompagner les deux transferts précédents.

c) Par rayonnement : Un point matériel chauffé émet un rayonnement électromagnétique dans toutes les directions situées d'un même côté du plan tangent au point matériel. Lorsque ce rayonnement frappe un corps quelconque, une partie peut être réfléchie, une autre transmise à travers le corps (dit diathermique si tout est transmis), et le reste est quantitativement absorbé sous forme de chaleur. Si on place dans une enceinte deux corps capables d'émettre un rayonnement thermique, il existe entre ces deux corps à températures différentes un échange de chaleur dû à l'absorption et à l'émission de ces rayonnements thermiques. Cet échange de chaleur est désigné habituellement sous le nom de rayonnement. Les transferts par rayonnement se poursuivent même lorsque l'équilibre thermique est atteint, mais le débit net de chaleur échangé est nul. Ce type de transport de chaleur est analogue à la propagation de la lumière, et il ne nécessite aucun support matériel, contrairement aux écoulements. Les gaz, les liquides et les solides sont capables d'émettre et d'absorber les rayonnements thermiques. Dans de nombreux problèmes de transformation d'énergie thermique, les trois modes de transfert de chaleur coexisteront mais, généralement, au moins une des trois formes pourra être négligée, ce qui simplifiera le traitement mathématique de l'appareil de transfert. Nous pouvons dire dès à présent, qu'aux températures ordinaires, le transport par rayonnement est négligeable, mais il peut devenir notable et prépondérant lorsque le niveau de température augmente. Dans ce qui suit nous allons présenter, pour les deux types de transport de la chaleur, (conduction, convection) les lois générales qui les gouvernent.

I.3). transfert de chaleur par conduction

La conduction résulte de « chocs » à l'échelle moléculaire et atomique. Elle va donc être très liée à la structure et à l'organisation du matériau. Elle peut avoir lieu dans les solides et dans une moindre mesure dans les fluides, plus dans les liquides que dans les gaz. C'est un phénomène très

analogue à la conduction de l'électricité. Il s'agit d'un transfert d'énergie à petite échelle, dans un corps localement au repos. On parlera de conducteur ou d'isolant de la chaleur. Elle est décrite par la loi de Fourier (1807).

Le flux de chaleur (W/m^2) transféré par conduction dans une direction donnée est proportionnel au gradient de température dans cette direction, est donc telle que la composante sur l'axe Ox du flux est

égale :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (\text{I.3})$$

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi_x = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{I.4})$$

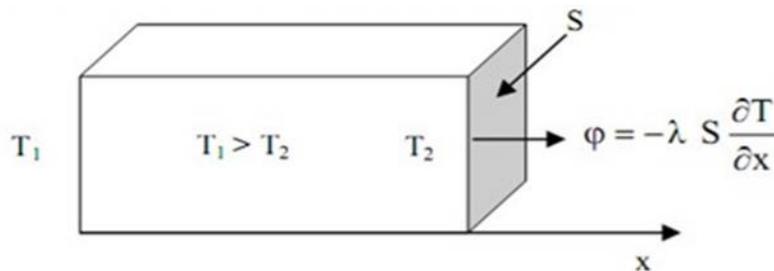


Figure I.2 : Transfert de chaleur par conduction sur l'axe Ox [01]

-Dans cette loi le coefficient de proportionnalité est une caractéristique physico-chimique du point matériel désignée sous le nom de conductivité ou conductibilité thermique.

-Dans le système international, elle s'exprime en $[\text{W/m.K}]$.

-Le coefficient de transfert thermique est un flux thermique au travers d'une surface d'échange.

-Il permet de calculer l'intensité de l'énergie échangée par unité de surface et unité de temps en fonction de la différence de température de part et d'autre de la surface d'échange. C'est un terme important dans l'équation d'un transfert thermique et permet d'indiquer la facilité avec laquelle l'énergie thermique passe au travers de la surface d'échange.

-Dans le Tableau I.1, sont reportées les conductivités de quelques corps solides. D'une façon générale, les métaux sont beaucoup plus conducteurs de la chaleur que les substances non métalliques.

I.3.a) Propriété de matériaux

Tableau I.1 : conductivités de quelques matériaux [01]

Matériau	(W m ⁻¹ °C ⁻¹)	Matériau	(W m ⁻¹ °C ⁻¹)
Argent	419	Plâtre	0,48
Cuivre	386	Amiante	0,16
Aluminium	204	Coton	0,059
Acier doux	45	Liège	0,044-0,049
Acier inox	14,9	Laine de roche	0,038-0,041
Glace	1,88	Laine de verre	0,035-0,051
Béton	1,4	Polystyrène expansé	0,036-0,047
Bois (feuillu-résineux)	0,12-0,23	Polyuréthane (mousse)	0,030-0,045
Brique terre cuite	1,1	Polystyrène extrudé	0,027
Verre	0,78	Air	0,026

Exemple :

Le flux de chaleur ϕ (en W) qui traverse une paroi constituée d'un seul matériau de conductivité thermique λ (en W/(m.°C)), d'épaisseur e (en m) et d'aire S (en m²) est donné par la relation suivante :

$$\phi = \lambda \frac{S}{e} (T_2 - T_1) \quad (I.5)$$

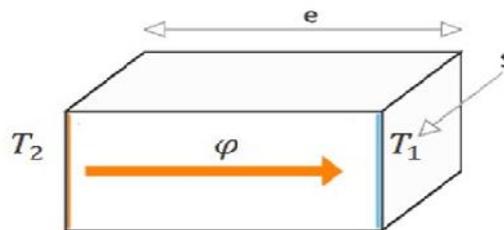


Figure I.3: Exemple de Transfert de chaleur par conduction [01]

T2 et T1 représentent respectivement la température (en °C ou °K si la conductivité est en °K) de la face la plus chaude et de la face la plus froide.

I.3.b) Propriété des fluides

a) AIR

Tableau I.2 : propriété de l'air [01]

Température	Conductivité thermique	Viscosité dynamique	Masse volumique	Chaleur spécifique
T	$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$	$\frac{Pa \cdot s}{m}$	$\frac{Kg}{m^3}$	$\frac{J}{Kg \cdot ^\circ C}$
°C	W/m.°C	Pa.s	Kg/m ³	J/Kg.°C
-20	0,02256			
0	0,02313	17,19 10 ⁻⁶	1,275	1000
20	0,02512			
40	0,02652			
50	0,02680	19,26 10 ⁻⁶	1,275	1005
60	0,02791			
80	0,02931		1,275	
100	0,03070	2,34 10 ⁻⁶		1009

-La viscosité dynamique dont l'unité est le Pa.s souvent dénommée poiseuille (1 poiseuille = 1 Pa.s) est souvent confondue avec la viscosité cinématique qui est égale à μ/ ρ .

La masse volumique de l'air qui se comporte comme un gaz parfait peut s'écrire dans les conditions normales de pression (P = 101325 Pa) sous la forme $\rho = \rho_0 \cdot 273 / (T+273)$

Avec

ρ_0 Masse volumique à 0°C

T température de l'air en °C

Dans le domaine des températures -20, +100°C les paramètres caractéristiques du nombre de Prandtl varient peu pour tous les gaz usuels à la pression atmosphérique. Aussi, est-il courant de prendre pour le nombre de Prandtl une valeur moyenne de 0,75. [01]

b) Eau

Tableau I.3: propriété de l'eau [27]

température	Conductivité thermique	Viscosité dynamique	Masse Volumique	Chaleur spécifique
°C	$W/m \cdot ^\circ C$	$10^{-3} Pa \cdot s$	Kg/m^3	$J/Kg \cdot ^\circ C$
0	0,555	1,789	1000	4220
5		1,515		
10		1,306		4183
20	0,598	1,005	998	4178
30		0,802		
40	0,627	0,653	992	4178
50		0,550	988	
60	0,651	0,470	983	4191
70		0,406	977,7	
80	0,669	0,355	971,6	4199
90		0,315	965,1	
100 liquide	0,682	0,282	985,1	4216
100 vapeur	0,025	0,012	0.8	1900

Contrairement aux gaz, les propriétés des liquides, et en particulier de l'eau, varient en fonction de la température. C'est le cas par exemple pour la viscosité dynamique.

I.4) transfert de chaleur par convection

C'est un transfert qui résulte d'un mouvement d'ensemble du matériau le supportant.

La convection a donc lieu dans les fluides (gaz ou liquides). Elle est souvent caractéristique de l'échange à la frontière entre un solide et un fluide et est donc très liée à l'écoulement fluide mais aussi aux géométries d'échange et aux états de surface si un solide intervient. Il convient de distinguer la convection forcée dans laquelle le fluide est mis en mouvement par un apport d'énergie mécanique extérieur (pompe, ventilateur, ...) de la convection naturelle dans laquelle le fluide prend, en son sein,

l'énergie nécessaire au mouvement (variation de masse volumique associée à une variation de température par exemple). De façon macroscopique elle est décrite par la loi de Newton (1701).

$$q = hS(T_p - T_{\infty}) \tag{I.6}$$

Remarque :

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

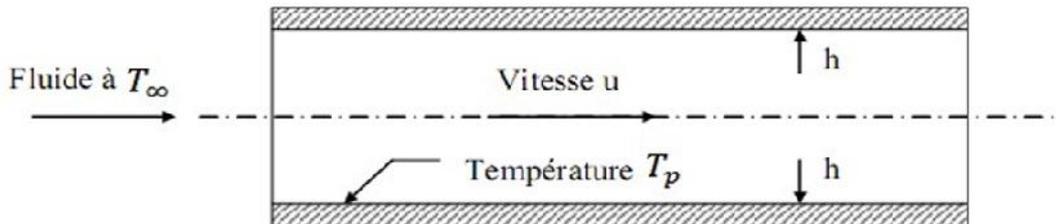


Figure I.4 : coefficient de transfert de chaleur par convection h [27]

I.4.1) Convection sans changement d'état :

Les transferts de chaleur qui s'effectuent simultanément avec des transferts de masse sont dits transferts de chaleur par convection. Ce mode d'échange de chaleur existe au sein des milieux fluides dans lesquels il est généralement prépondérant.

I.4.1.a) Convection naturelle et forcée

Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue :

1)- **La convection libre ou naturelle** : le fluide est mis en mouvement sous le seul effet des différences de masse volumique résultant des différences de températures sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (la pesanteur).

PRINCIPE

$$\Phi = h_c \cdot S (T_s - T_f) \quad (I.7)$$

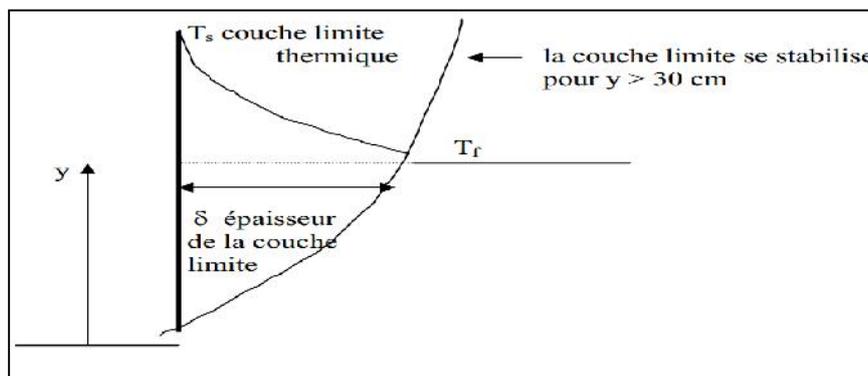


Figure I.5 : convection naturel [27]

- Grandeur caractéristique

$$G_r = \frac{l^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\mu^2} \quad \text{Nombre de GRASHOF} \quad (I.8)$$

Le nombre de Grashof est à la convection naturelle ce que le nombre de Reynolds est à la convection forcée

l : dimension linéaire caractéristique de la surface d'échange (ex ; côté d'un carré, diamètre d'un tube....) en m

β : coefficient de dilatation volumique du fluide en $(C^\circ)^{-1}$

Ex : air : $\beta = 1/T$ (T température en k)

eau : 20C° $\beta = 0.20$

60C° $\beta = 0.53$

90C° $\beta = 0.67$

ΔT : écart de température paroi – fluide(en C°)

g : accélération de la pesanteur (9.81 m/s^2)

ρ : masse volumique du fluide en Kg/m^3

μ : viscosité dynamique du fluide en $\text{Pa} \cdot \text{s}$

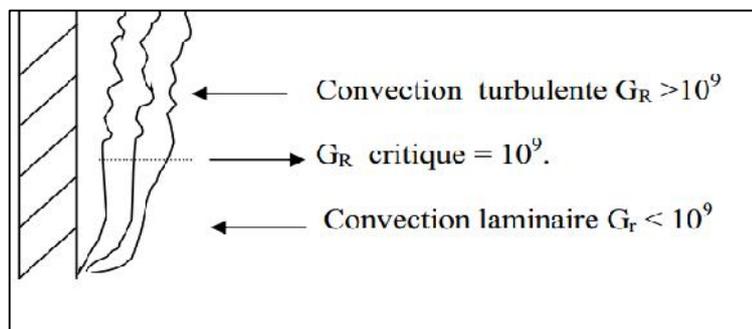


Figure I.6 : les zones dans la convection naturelle [01]

Expression du NUSSELT

Les relations ont de la forme : $Nu = C.(G_r.P_r)^n$ (I.9)

Avec $n = 1/4$ pour la convection laminaire

$n = 1/3$ pour la convection turbulente

Le coefficient C dépend du régime de convection et la géométrie

convection laminaire $0.2 < C < 0.6$

convection turbulente $0.07 < C < 0.15$

Tableau I.4 : Coefficients d'échange pour l'air en convection naturelle (régime laminaire)[27]

Géométrie et Orientation de la paroi	Coefficient de convection laminaire h_c (W/m ² .C°)	Dimension caractéristique (m)
Plaque verticale dont la hauteur est inférieure à 30 cm (ou cylindre vertical)	$h_c = 1.42 \left(\frac{\Delta T}{H} \right)^{0.25}$	H : hauteur de la plaque
plaque verticale dont la hauteur est supérieur à 30 cm (ou cylindre vertical)	$h_c = 1.78 \Delta T^{0.25}$	/
Cylindre horizontal	$h_c = 1.32 \left(\frac{\Delta T}{D_e} \right)^{0.25}$	Diamètre extérieur Du cylindre
Plaque horizontale chauffant ver le haut	$h_c = 1.32 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0.25}$	L : largeur de la plaque
Plaque horizontale chauffant ver le bas	$h_c = 0.66 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0.25}$	L : largeur de la plaque
Sphère	$h_c = \frac{0.66 (1.17)}{(1.14 + \frac{D}{16})} \Delta T^{0.25}$	D : diamètre de la sphère

ΔT = écart de température paroi – air

2)- La convection forcée : le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur...).

L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi.

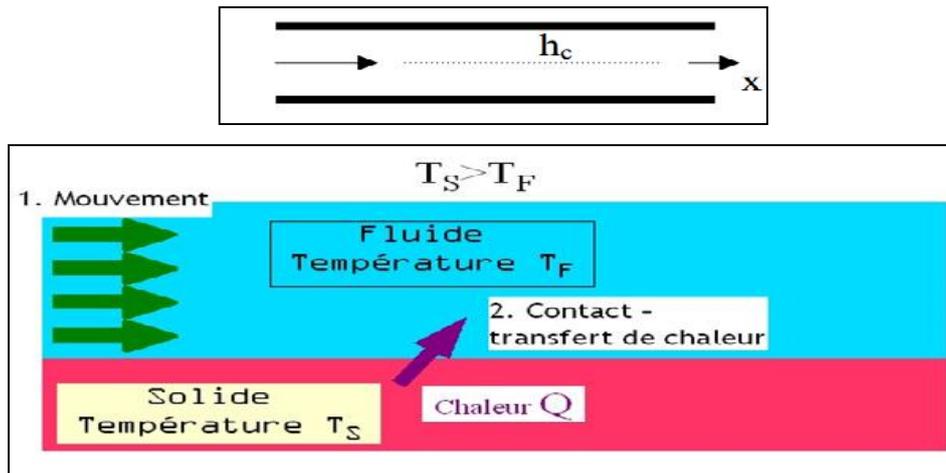


Figure I.7: Transfert de chaleur par convection [27]

Dans un tube

h_c dépend

- v_m vitesse moyenne du fluide m/s
- ρ masse volumique du fluide Kg/m^3
- C_p chaleur spécifique du fluide $J/Kg.C^\circ$
- λ conductivité thermique u fluide Pa.s
- D diamètre intérieur du tube m
- x abscisse m

Remarque : h_c en convection forcée ne dépend pas de $(T_f - T_S)$

A partir du théorème de Vaschy- Buckingham, h_c peut s'exprimer en fonction de 4 unités fondamentales (nombre adimensionnels)

$$N_u = \frac{h.D}{\lambda} \text{ nombre de NUSSELT} \tag{I.10}$$

↳ Caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi

$$R_e = \frac{\rho.V_m.D}{\mu} \text{ nombre De REYNOLDS} \tag{I.11}$$

↳ Caractérise le régime d'écoulement
 $R_e < 2000$ écoulement laminaire
 $R_e > 3000$ écoulement turbulent

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} \quad \text{nombre de PRAANDTL} \quad (I.12)$$

↳ Caractérise les propriétés thermiques du fluide

$\frac{x}{D}$ = abscisse réduite

-A partir d'études expérimentales des corrélations sont proposées par différents auteurs.

REMARQUE : être vigilant sur le domaine d'application des corrélations.

I.5) Régime d'écoulement

Compte-tenu du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est nécessaire de considérer le régime d'écoulement. Considérons à titre d'exemple l'écoulement d'un fluide dans une conduite :

I.5.a)- En régime laminaire, l'écoulement s'effectue par couches pratiquement indépendantes.

-Entre deux filets fluides adjacents les échanges de chaleur s'effectuent donc :

- Par conduction uniquement si l'on considère une direction normale aux filets fluides.

- Par convection et conduction (négligeable) si l'on considère une direction non normale aux filets fluides.

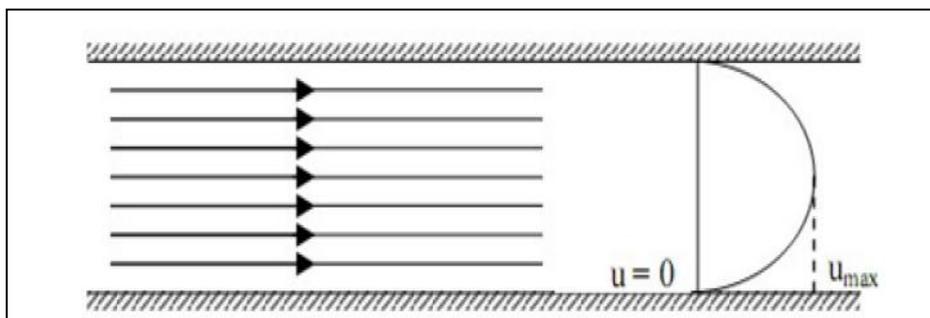


Figure I.8: régime laminaire [27]

I.5.b) -En régime turbulent, l'écoulement n'est pas unidirectionnel :

L'échange de chaleur dans la zone turbulente s'effectue par convection et conduction dans toutes les directions. On vérifie que la conduction est généralement négligeable par rapport à la convection.

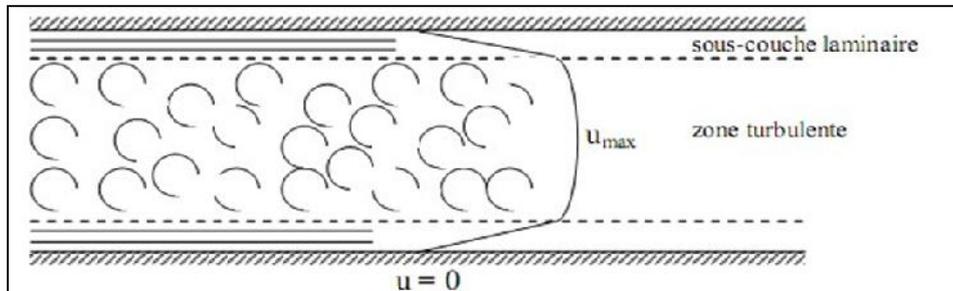


Figure I.9: régime turbulent [27]

Cette loi simple présente néanmoins une énorme difficulté dans son application puisque l'on ne connaît pas l'épaisseur e du film laminaire. C'est ce qui amène à définir un coefficient de transfert superficiel ou coefficient de transfert de chaleur par convection par :

$$h = \frac{\lambda}{e} \quad (I.13)$$

Quelque soit le type de convection (libre ou forcée) et quelque soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur est donné par la relation dite LOI de NEWTON.

I.6) Expression du flux de chaleur

On considère que cette résistance thermique R est équivalente à celle que le flux de chaleur rencontrerait en conduction à travers une paroi dont l'épaisseur serait celle du film laminaire et qui posséderait les mêmes caractéristiques thermiques que le fluide soit :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (I.14)$$

Avec :

e : épaisseur du film laminaire

λ : Conductivité thermique du fluide

Rigoureusement, le flux de chaleur par unité de surface s'écrit alors :

$$\varphi = \frac{\lambda}{e} (T_p - T_i) \quad (I.15)$$

Où T_i est la température à la limite du film laminaire.

Pour un régime thermique bien établi, on peut considérer en première approximation que par suite des courants de convection la masse fluide au-delà du film laminaire est à une température constante et prendre comme loi de la densité de flux de chaleur la relation :

$$\varphi = \frac{\lambda}{e} (T_p - T_\infty) \quad (I.16)$$

I.7) Calcul de la déformation thermique

Les valeurs des coefficients de dilatation sont déterminées par des essais de dilatomètre qui ont lieu à partir de la température ambiante (0°C ou plus généralement 20°C). De ce fait, on dispose en général des valeurs du coefficient de dilatation défini par rapport à 20°C (température à laquelle on suppose la déformation thermique nulle).

Certaines études nécessitent de prendre une température de référence différente de la température ambiante (déformation thermique nulle pour une autre température que la température ambiante).

Il faut alors effectuer un changement de repère dans le calcul de la déformation thermique (figure ci-dessous).

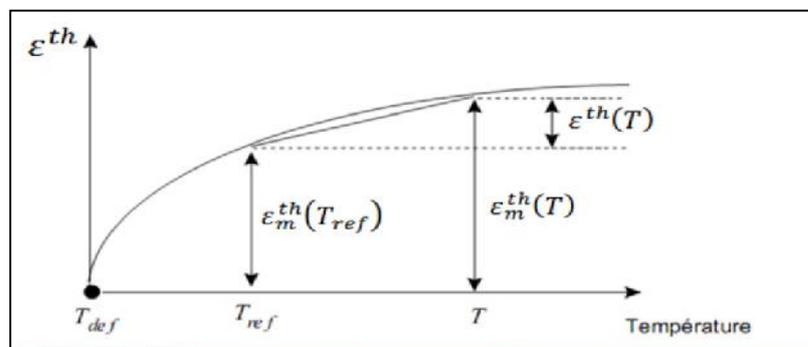


Figure I.10 : calcul de la déformation thermique [01]

$$\varepsilon^{th}(T) = \varepsilon_m^{th}(T) - \varepsilon_m^{th}(T_{ref}) \quad (I.17)$$

$\varepsilon_m^{th}(T_{ref})$: est la déformation thermique mesurée (définie par rapport à la température ambiante)

$\varepsilon^{th}(T)$: est la déformation thermique calculée (définie par rapport à une température de référence).

La déformation thermique est calculée par l'expression :

$$\varepsilon^{th} = \alpha (T - T_{ref}) \quad (I.18)$$

Où $\alpha(T)$ est le coefficient de dilatation moyen à la température T déterminé par rapport à la température T_{ref} (T_{ref} étant la température à laquelle on considère que $\varepsilon^{th}(T_{ref})=0$).[02]

I.7.a) Coefficients de dilatation thermique (cas isotrope)

On peut calculer pour tous les matériaux isotropes la variation de longueur et donc de volume en fonction de la variation de température

$$L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (I.20)$$

- ✓ ΔL est la variation de longueur en mètre (m).
- ✓ α , est le coefficient de dilatation linéaire en kelvin puissance moins un (K^{-1})
- ✓ L_0 , est la longueur initiale en mètre (m)
- ✓ $\Delta T = T - T_0$, la variation de température en kelvin (K) ou en degré Celsius ($^{\circ}C$)

Remarque : puisqu'on utilise une variation (une différence de température) la différence d'origine entre kelvin et degré Celsius s'annule, la distinction n'est donc pas nécessaire.

On peut aussi directement calculer la longueur en fonction de la température :

$$L(T) = L_0 + \Delta L = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)) \quad (I.21)$$

Avec :

- $L(T)$: la longueur en mètre (m) en fonction de la température
- T , la température considérée en kelvin (K) ou en degré Celsius ($^{\circ}C$)
- T_0 , la température initiale en kelvin (K) ou en degré Celsius ($^{\circ}C$)

I.7.b) Tenseur de dilatation thermique

Les matériaux cristallins non cubiques présentent une dilatation thermique anisotrope : on n'observe pas le même coefficient de dilatation dans toutes les directions. Pour cette raison, on utilise un tenseur symétrique d'ordre 2 pour décrire la dilatation dans les matériaux anisotropes :

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} = \alpha_{12} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} = \alpha_{13} & \alpha_{32} = \alpha_{23} & \alpha_{33} \end{bmatrix}$$

Ainsi, Pour un cristal orthorhombique par exemple, où $\alpha_{12} = \alpha_{13} = \alpha_{23} = 0$ le tenseur de dilatation est diagonal et α_{11} , α_{22} et α_{33} décrivent la dilatation le long des trois directions cristallographiques.

Les valeurs propres du tenseur de dilatation thermique, ou coefficients de dilatation linéaires principaux α_1 , α_2 et α_3 , permettent aussi d'obtenir le coefficient de dilatation volumique, trace du tenseur : $\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = \alpha_{11} + \alpha_{22} + \alpha_{33}$ puisque la trace d'une matrice carré est invariante par changement de base.

Le Tableau I.2 : présenté le Coefficients de dilatation linéaires pour les principaux matériaux Les coefficients donnés ci-dessous est valables pour des températures comprises entre 0 °C et 100 °C. En réalité ces coefficients dépendent de la température, la loi d'allongement n'est donc pas linéaire pour des différences de température très élevées.

Tableau I.5: Coefficients de dilatation linéaires de quelques matériaux

substances	coefficient de dilatation linéaire [1/K]
acier	$12,0 \times 10^{-6}$
aluminium	$23,8 \times 10^{-6}$
argent	$19,7 \times 10^{-6}$
bronze	$17,5 \times 10^{-6}$
cuivre	$16,5 \times 10^{-6}$
fonte	$10,5 \times 10^{-6}$
laiton	$18,5 \times 10^{-6}$
molybdène	$5,2 \times 10^{-6}$
nickel	$13,0 \times 10^{-6}$
nylon	30×10^{-6}
platine	$9,0 \times 10^{-6}$
plomb	$29,0 \times 10^{-6}$
tungstène	$4,5 \times 10^{-6}$

Chapitre II : les
solicitations et contraintes
appliquées aux pipelines

II-1. Introduction

L'étude du comportement mécanique des matériaux a pour but de connaître leur réponse à une sollicitation donnée. Les variables mises en jeu dans ce domaine sont :

- le tenseur des contraintes .
- le tenseur des déformations .

L'objectif de ce document est de donner un aperçu assez général du comportement mécanique des matériaux, et de sa modélisation. En effet, si l'élasticité linéaire représente actuellement le cadre de la majorité des calculs de mécanique des milieux continus réalisés dans l'industrie, d'autres types de comportement sont de plus en plus utilisés car ils s'approchent plus de la réalité, et permettent donc un dimensionnement plus strict des structures ou de certains procédés.

Un premier exemple concerne le dimensionnement d'une structure, en vue de l'adapter aux sollicitations qu'elle subira (choix du matériau, optimisation de la forme, respect des points de fonctionnement, . . .). Dans des zones accidentées telles que les congés de raccordement, ou au voisinage de porosités ou d'inclusions, la sollicitation mécanique en service est amplifiée par un certain facteur. On parle de "concentration de contraintes". Lorsque ces zones sont relativement petites, le matériau peut avoir un comportement globalement élastique, alors que la structure "plastifie" localement. La prise en compte de cette "plastification locale" permet d'améliorer par exemple les prévisions de durée de vie des structures dans l'automobile ou dans l'aéronautique. Un autre exemple est la mise en forme d'une pièce (forgeage, emboutissage,...), où la déformation plastique du matériau est à la base du procédé.

La connaissance de son comportement plastique permet de mieux appréhender les efforts qui seront mis en jeu (gamme de fabrication, choix de la presse, cadence, . . .), ainsi que les défauts susceptibles d'être générés par cette mise en forme.

Dans le chapitre un de ce document, nous d'écrivons les essais mécaniques couramment utilisés pour caractériser le comportement mécanique des matériaux, puis nous donnons quelques lois phénoménologiques utilisées dans les calculs simples. Dans le chapitre deux, nous donnons le cadre thermodynamique dans lequel les lois de comportement des matériaux doivent s'inscrire. Ensuite, nous nous intéressons aux comportements élastiques, thermoélastiques et viscoélastiques linéaires, puis à la modélisation de l'érouissage plastique ou viscoplastique. Le dernier chapitre est consacré aux principaux modèles d'endommagement et de rupture des matériaux. [03]

II-2. Direction de sollicitation

Lors de la réalisation d'essais mécaniques, le choix de la direction de sollicitation peut s'avérer primordial. En effet, il conditionne souvent le domaine de validité de la loi de comportement obtenue. On peut classer les directions de sollicitation en deux grandes catégories : les sollicitations uniaxiales et les sollicitations multiaxiales. On parle alors d'essai "uniaxial" ou d'essai "multiaxial". Les principaux essais uniaxiaux utilisés sont :

- la traction-compression
- la torsion

- la flexion

II.2.1. Les essais mécaniques

L'éprouvette est alors sollicitée dans une direction de l'espace des contraintes. La variation du paramètre de l'essai ne change pas cette direction. Les essais multiaxiaux sont nombreux et variés. Ils sont plus difficiles à interpréter.

Ils consistent le plus souvent à combiner plusieurs sollicitations uniaxiales entre elles au cours du temps, de façon à tester l'influence de la direction de sollicitation sur le comportement du matériau. L'essai multiaxial le plus courant est celui de "traction-torsion".

a-Traction-Compression

- La traction-compression est l'essai le plus couramment utilisé sur les métaux (figure II.1). Toutefois, les déformations atteintes par ce type d'essai sont limitées par la rupture du matériau (en traction), et par le flambage de l'éprouvette (en compression). Ce type d'essai est donc principalement utilisé pour obtenir une loi de comportement simple et rapide en traction, ou pour solliciter cycliquement le matériau en traction-compression, à faibles déformations, et obtenir une loi de comportement en fatigue (voir paragraphe suivant).

Pour avoir accès à une loi de comportement valable pour de plus grande déformations qu'en traction, on réalise donc des essais spécifiques de compression. Le dépouillement de l'essai est cependant rendu délicat par la présence de frottement à l'interface éprouvette-outil.

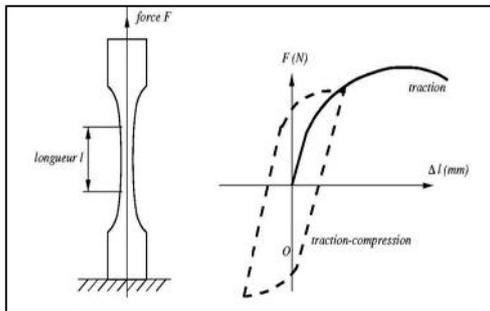


Figure II.1: Schématisation de l'essai de traction-compression [04]

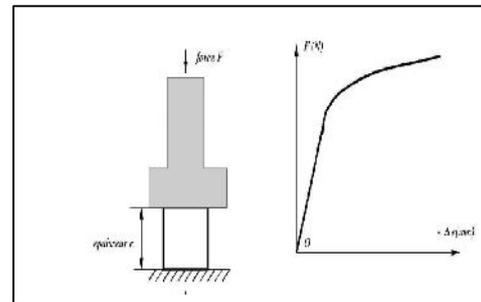


Figure II.2: Schématisation de l'essai de compression [04]

b- Torsion

- L'essai de torsion permet d'avoir accès à une loi de comportement pour de grandes déformations, sans problèmes de frottement entre l'éprouvette et l'outil.

Cependant, la déformation et la contrainte ne sont pas homogènes le long du rayon de l'éprouvette. On utilise donc parfois un cylindre à paroi mince comme éprouvette (figure II.3).

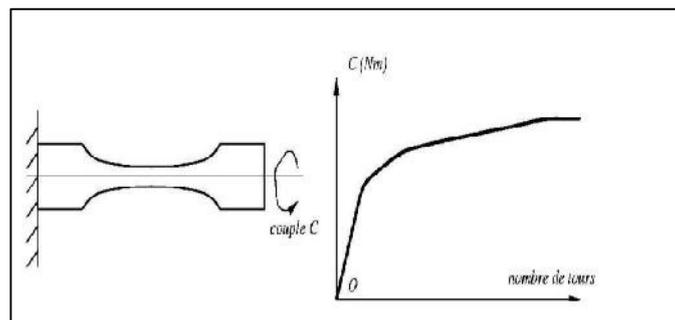


Figure II.3: Schématisation de l'essai de torsion[04]

c- Flexion

La flexion est l'essai le plus couramment employé sur les céramiques. La flexion quatre points permet de solliciter le matériau avec un moment constant entre les deux points d'application de la charge. Comme en torsion, la déformation et la contrainte ne sont pas constantes dans l'épaisseur de l'éprouvette (figure II.4).

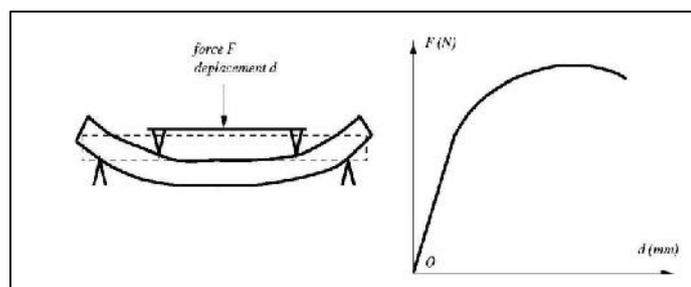


Figure II.4: Schématisation de l'essai de flexion quatre points [04]

II.2.2. Essais monotones

- Les essais monotones les plus classiques sont ceux de traction, de compression, de torsion et de flexion. La sollicitation est alors appliquée au matériau jusqu' à sa rupture (traction, torsion, flexion) ou jusqu' à une déformation suffisamment grande (compression). En fonction du mode d' application de la sollicitation, on peut réaliser principalement des essais d' écrouissage, de fluage, ou de relaxation, et les combiner entre eux (essais d' écrouissage-relaxation, . . .).

La figure II.5 montre une courbe "force-allongement" (et la courbe contrainte déformation associée) typique obtenue sur un métal lors d' un essai d' écrouissage en traction monotone. Ce type d' essai est généralement réalisé à des vitesses comprises entre 10^{-3} et $1s^{-1}$. On distingue successivement :

– un domaine de comportement élastique réversible, où l' arrêt de la sollicitation permet à l' éprouvette de retourner dans son état initial, et où les contraintes et les déformations sont reliées linéairement par la loi de Hooke.

– un domaine de comportement plastique homogène, caractérisé par une déformation irréversible du matériau.

– un domaine de comportement plastique hétérogène, initié par l' apparition d' une "striction".

La déformation se localise dans l' éprouvette jusqu' à rupture de celle-ci. Les essais de fluage sont réalisés en appliquant une contrainte constante au matériau, en général en traction. Le type de courbe obtenu est donné sur la figure. Elle représente la déformation de l' éprouvette en fonction du temps, pour une contrainte constante donnée. Une première déformation apparaît instantanément à la mise en charge. C' est la déformation correspondant à la contrainte appliquée dans un essai d' écrouissage. [04]

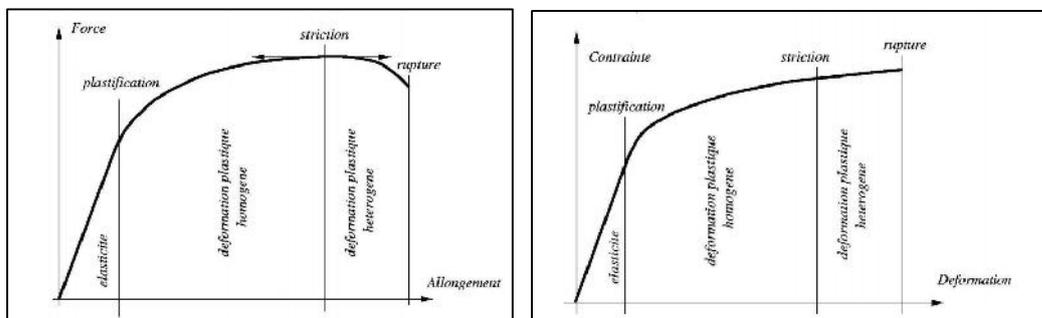


Figure II.5: Essais d'écrouissage en traction [04]

-Enfin, cette vitesse de déformation augmente (domaine de fluage tertiaire) jusqu' à la rupture. Les essais de relaxation servent à caractériser l' évolution au cours du temps des contraintes

internes d'un matériau. Pour cela, On applique une déformation constante à l'éprouvette, puis on observe l'évolution de la contrainte. Ce type d'essai est très utilisé pour obtenir les propriétés viscoplastiques du matériau.

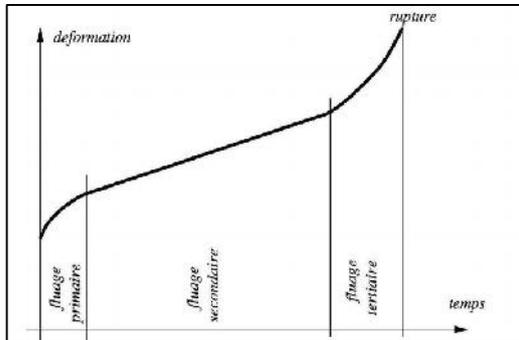


Figure II.6: Représentation schématique [04]

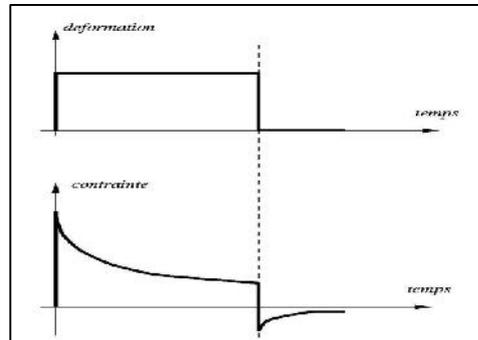


Figure II.7: Représentation schématique d'un essai de relaxation [04]

II-3. Les contraintes appliquées au pipeline

Si un tube est exposé à un changement de température, il essaiera d'adapter sa longueur, s'il peut se déplacer librement.

Le changement de longueur ΔL peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (I.1)$$

α = Coefficient de dilatation thermique ($0,2 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

L_0 = Longueur initiale à l'installation

T = Changement de température

Comme nous le constatons, le changement de longueur ne dépend pas du diamètre ni de l'épaisseur de la paroi.

Il y a eu des exemples réels où des canalisations étaient trop courtes en raison de changement de température.

Lorsqu'on estime la longueur d'un tube, il faut toujours prendre en considération les changements de température avant de passer une commande.

Si les mouvements du tube sont évités, il résultera une contrainte dans la paroi du tube.

Des lests en béton, des ancrs ou la couverture dans les tranchées peuvent éviter les mouvements du tube.

Si le tube est totalement fixe, la contrainte (σ_T) peut s'exprimer :

$$\sigma_T = -E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (\text{II.2})$$

E = Module d'élasticité (module de fluage) (MPa).

Une valeur positive est considérée comme une contrainte de traction.

- La contrainte ne dépend pas de la longueur du tube ni du diamètre. La contrainte se réduira dans le temps, car le module E diminue en raison de la relaxation de la matière PE.

II.3.1. Cas mécanique

-Les contraintes agissent dans le sens axial du tube et doivent être ajoutées/soustraites aux autres contraintes causées par la pression interne, le choc de l'eau et la couverture du sol. Nous avons considéré jusqu'à présent un changement homogène de température sur toute la canalisation. Une autre situation consiste en une différence de température au niveau de la paroi du tube. Il peut y avoir une température de l'eau circulant dans le tube et une autre de l'eau environnante à l'extérieur de la canalisation.

Dans ce cas, à la fois des contraintes supplémentaires de compression et de traction peuvent se produire.

Les contraintes agiront dans le sens radial.

Les contraintes maximales peuvent être calculées à partir de la formule :

$$\sigma_t = \frac{E \cdot \alpha \cdot (T_{\text{extérieure}} - T_{\text{intérieure}})}{2} \quad (\text{II.3})$$

Un signe négatif signifie une contrainte de compression, alors qu'un signe positif indique une contrainte de traction. Ces contraintes subiront également une relaxation au fil du temps.

A- Contrainte de flexion

Un tube en PE peut, en raison de sa flexibilité, être courbé jusqu'à une certaine courbure. Toutefois, il y a un rayon minimum qui ne peut pas être « dépassé », si on veut éviter la déformation.

Lors de cette flexion, une contrainte et des déformations se produiront dans le sens axial et radial du tube.

Lorsque le rayon de courbure est trop petit, le tube se déformera.

Tout particulièrement lors de l'immersion d'une canalisation sous-marine, il est nécessaire de s'assurer que le rayon de courbure est supérieur au rayon de déformation critique. Lors de l'installation, l'équilibre entre les forces (le poids des lests en béton, les forces des bateaux, les forces de la poussée d'Archimède, les forces provenant des courants et des vagues ou autres forces produites par l'homme) définit la configuration et la courbure maximale. Lorsqu'un tube est plié avec une courbure ayant un rayon R dans la direction de l'axe, une déformation, ϵ_a , se produira dans la paroi du tube. Cette déformation peut s'exprimer :

$$\epsilon_a = \frac{r}{R} = \frac{D}{2.R} \quad (\text{II.4})$$

r = Rayon du tube.

R = Rayon de courbure.

D = Diamètre extérieur du tube.

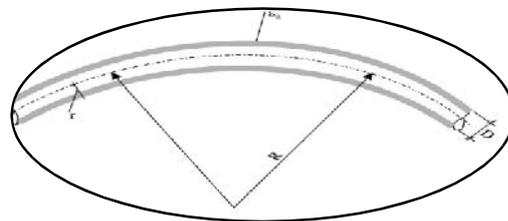


Figure II.8: Tube en PE sous flexion [04]

Pour fléchir un tube à ce rayon, R, il doit être soumis à un moment externe causé par les forces mentionnées ci-dessus. Le moment (M) peut être exprimé :

$$M = \frac{E.I}{R} \quad (\text{I.5})$$

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4) \quad (\text{moment d'inertie})$$

D = diamètre extérieur

d = diamètre intérieur

E = Module d'élasticité (module de fluage).

-La contrainte maximale dans le tube peut être estimée à partir de la loi de Hook.

$$\sigma_a = E \cdot \epsilon_a = E \cdot \frac{r}{R} = E \cdot \frac{D}{2.R} \quad (\text{II.6})$$

La contrainte est une traction dans la courbe extérieure et une compression dans la courbe intérieure. La valeur de la contrainte diminuera dans le temps en raison de la relaxation de la matière PE. [05]

Nous introduisons souvent le rapport :

$$\frac{R}{D} = a \quad (\text{II.7})$$

$$\varepsilon_a = \frac{1}{2a} \quad (\text{II.8})$$

$$\sigma_a = \frac{E}{2.a} \quad (\text{II.9})$$

B- Pression interne

La pression interne créera une contrainte dans la paroi du tube, à la fois dans le sens radial et dans le sens axial. La contrainte dans le sens axial dépend de la façon dont la canalisation est capable de boguer (fixe ou mouvement libre).

a- Sens radial

La Figure indique le système statique.

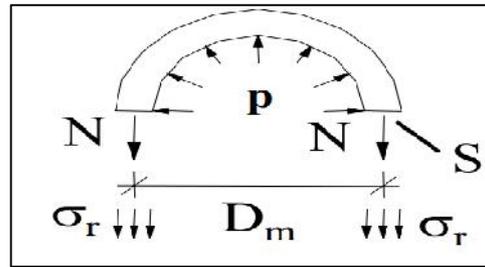


Figure II.9 : Système statique pour la pression interne, tube en coupe

Aucune contrainte tangentielle ne se produira par la pression interne. Il y aura juste une force de traction (N) dans le sens radial.

Si nous introduisons les éléments de pression, nous trouvons les résultats suivants basés sur l'équilibre des forces :

$$2. N = p. D_m \quad (\text{II.10})$$

N = Force de traction (N)

p = Pression (N/m² = Pa)

D_m = Diamètre moyen (m)

m = Diamètre moyen (m)

En introduisant la contrainte annulaire (σ_r) et l'épaisseur de la paroi (s), nous pouvons développer les formules suivantes

$$N = \sigma_r. s \quad (\text{II.11})$$

$$\sigma_r = \frac{p. D_m}{2.s} \quad (\text{II.12})$$

$$S = \frac{p D_m}{2 \cdot \sigma_r} \quad (\text{II.13})$$

$$S = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \sigma_r + P} \quad (\text{II.14})$$

r=contrainte de conception

D= diamètre extérieur

La contrainte () pour un tube donné, dans le sens radial, exposé à une pression (p), peut se calculer à partir de la formule :

$$\varepsilon_r = \frac{p}{2} (\text{SDR}-1) \quad \text{ou} \quad \text{SDR} = \frac{D}{S} \quad (\text{II.15})$$

b- Sens axial

La figure II.10 ci-dessous montre la contrainte et les déformations d'un tube exposé à la pression interne.

La pression interne fournira une déformation dans le sens axial, si le tube peut se déplacer.

Alors, le tube se raccourcira en raison du phénomène de contraction:

$$\varepsilon_1 = - \nu \cdot \varepsilon_r \quad (\text{II.16})$$

ε_1 = Déformation dans le sens axial

ε_r = Déformation dans le sens radial

ν = Nombre de Poisson (0.4-0.5)

S'il n'y a pas de force de frottement agissant contre

mouvement, il n'y aura pas de contrainte permanente

dans le sens axial et le raccourcissement (ΔL) s'appliquera entièrement comme l'indique la formule (II.16). C'est le cas d'une canalisation flottant librement en surface :

$$\Delta L = - \nu \cdot L \cdot \varepsilon_r \quad (\text{II.17})$$

L = Longueur du tube. [06]

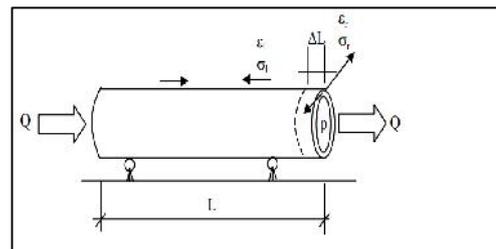


Figure II.10: Tube exposé à la pression interne [06]

Pour estimer σ_r nous devons introduire la loi de Hook :

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E} \quad (\text{II.18})$$

σ_r = Contrainte dans le sens radial (réf. formule II.11)

E = Module d'élasticité (module de fluage)

Cela donne :

$$\varepsilon_r = \frac{p}{2E} (\text{SDR}-1) \quad (\text{II.19})$$

$$\Delta L = \frac{v.L.P}{2E (\text{SDR}-1)} \quad (\text{II.20})$$

C- Coup de bélier

Le coup de bélier (montée soudaine de pression) se produit dans une canalisation quand il y a un brusque changement de débit. Le résultat est une onde de pression allant vers l'arrière et vers l'avant dans le système. La raison la plus courante d'une montée de pression est le démarrage et l'arrêt soudains des pompes ou l'ouverture et la fermeture des vannes. Même si un convertisseur de fréquence est installé sur les pompes, l'alimentation électrique peut tomber en panne. Des calculs exacts sur les coups de bélier sont compliqués à réaliser et doivent être effectués par des programmes informatiques. [07]

II-3.2. Contraintes résiduelles due au soudage

-Le soudage des aciers fait intervenir de nombreux phénomènes physiques, de l'ordre de la thermique (chauffage et refroidissement du matériau), de la métallurgie (solidification et transformation de phases des matériaux), de la mécanique des fluides (fusion des matériaux) et de la mécanique des solides (apparition de contraintes et déformations résiduelles).

-Les contraintes résiduelles s'ajoutent aux sollicitations de service et peuvent, de ce fait, altérer le comportement mécanique d'une construction et notamment diminuer sa résistance à la rupture fragile, à la fatigue et à la corrosion sous tension.

-L'origine des contraintes résiduelles de soudage est liée à la localisation de la source de chaleur et aux variations des propriétés mécaniques des matériaux en fonction de la température.

Très schématiquement, on peut distinguer deux sources de contraintes résiduelles :

Les contraintes résiduelles d'origine purement thermique, qui proviennent du fait suivant: soumis à une élévation de température, un élément de la zone centrale chauffée devrait se dilater d'une quantité $E \cdot \alpha$ désignant le coefficient de dilatation linéaire du matériau. En réalité, cette expansion est très limitée puisque les parties froides avoisinantes jouent le rôle d'éléments de bridage « autobridage ». L'élément est donc soumis à une compression de leur part. La limite d'écoulement étant très faible à haute température, toutes les déformations apparaissent correspondent à des

déformations plastiques. Au refroidissement, la situation s'inverse: la zone centrale chauffée ne peut se rétracter librement, et est mise en tension par les zones avoisinantes. Après refroidissement, les zones chauffées (métal fondu et ZAT) seront soumises à des contraintes résiduelles de traction, les zones avoisinantes étant, pour des raisons d'équilibre, en compression. Dans le métal fondu, les contraintes ainsi créées peuvent être très élevées, de l'ordre de grandeur de la limite d'élasticité du matériau à température ambiante.

Le bref rappel des principes des différents procédés de soudage montre qu'un certain nombre de phénomènes métallurgiques pourront être mis en jeu ; leur liste, tous procédés confondus, s'établit comme suit :

a- Phénomènes dus aux variations de température :

- Fusion et élaboration du bain liquide,
- Solidification,
- Transformations allotropiques,
- Dilatation,

b- Phénomènes dus à l'environnement :

- Action de l'atmosphère,
- Actions des polluants,

c- Phénomènes dus aux inclusions :

Dans cette partie nous ne tenons compte que les phénomènes qui sont dues à l'élévation de température. [08]

II-4. Plan d'Intervention sur Gazoducs en Exploitation

Pour toute canalisation de transport, il est mis en œuvre des techniques éprouvées permettant de s'assurer que les ouvrages construits présentent un haut niveau de sécurité pour la population vivant à leur proximité ainsi que pour l'environnement.

Cependant, les risques de rupture accidentelle sur une canalisation de transport du gaz naturel ne sont pas à écarter du fait de leur emplacement dans des zones à fortes activités et fortes urbanisations et peuvent engendrer des conséquences graves sur la population, les biens et l'environnement.

L'objet de la présente étude est la préparation d'un plan d'intervention sur gazoducs suite à incidents dans le but de minimiser les risques sur l'environnement immédiat et réduire les durées d'interruption de la fourniture de gaz. Seuls les gazoducs de diamètre supérieur à 16'' sont concernés par ce plan d'intervention.

II.5. Les facteurs de risques

-Les facteurs risques d'accidents pouvant survenir au moment de la mise en service ou pendant l'exploitation d'ouvrages et autres ouvrages associés (postes de sectionnement, postes de coupure, postes d'interconnexions et postes de livraison) de transport gaz et qui peuvent conduire à une fuite de gaz à l'atmosphère sur

Canalisation sont scindés en deux parties :

- Les risques que peut présenter l'ouvrage : internes
- Les risques qu'encourt l'ouvrage du fait de son environnement : externes

II.5.1. Les facteurs de risques internes

a- Corrosion interne :

La présence dans le gaz naturel de l'eau ou de condensats à l'état liquide peut entraîner la formation de corrosion interne des parois des tubes ou des appareils de réseau qui peut aboutir à une fuite de gaz.

b- Corrosion externe :

L'absence prolongée ou les arrêts fréquents de protection cathodique sur un ouvrage engendre des corrosions externes qui sont aggravées par les défauts de revêtement.

2. Défaillance de procédure et d'organisation – Erreur humaine :

Le non-respect des procédures et d'organisation engendre des risques d'inflammation ou de rupture (mauvaise exécution de soudures) lors des interventions pour travaux de raccordement ou lors d'interventions en charge.

3. Risque liés à la qualité de l'ouvrage :

a- Fragilité

b- Résistance à la pression

c- Fatigue des matériaux

II. 5.2. Les Facteurs de risques externes (subis par l'ouvrage durant l'exploitation)

1. Risques liés à l'environnement naturel

- ❖ La nature du sol
- ❖ Séismes
- ❖ Incendie à proximité

2. Risque de rupture : Risques liés aux activités extérieures à l'ouvrage

- ❖ Les travaux tiers à proximité
- ❖ Les voies de circulation (routières, ferrées)
- ❖ Autres réseaux enterrés [09]

Un exemple réel d'un accident à cause par la corrosion

Le 2 décembre 1997 à 7 h 42, heure normale du Centre, la canalisation 100-3 de 914 millimètres de diamètre extérieur de la TransCanada PipeLines Limited s'est rompue à un endroit où elle était affectée par la corrosion extérieure, à la hauteur de la vanne de canalisation principale 5-3 + 15,049 kilomètres, près de Cabri (Saskatchewan). Environ $3\,252 \times 10^3$ mètres cubes de gaz naturel se sont échappés par suite de la rupture. Le gaz s'est enflammé immédiatement et a causé des dommages au sol et à la végétation environnante. L'incendie principal s'est éteint de lui-même dans les 20 minutes qui ont suivi la rupture de la canalisation.[10]



Figure II-11 : un pipeline infect par la corrosion[28]

Analyse

L'étendue de la corrosion à la surface de la conduite indique que le revêtement extérieur du gazoduc avait subi des dommages ou s'était détaché et que la protection cathodique du gazoduc n'était pas adéquate. La canalisation s'est rompue après que la corrosion a aminci la paroi à un

point tel que cette dernière ne pouvait plus supporter l'effort normal d'exploitation. Un programme d'inspections internes visant à révéler les pertes en métal aurait permis d'identifier les secteurs où les pertes en métal avaient atteint des niveaux inacceptables. [10]



Figure II-12: La corrosion due au recouvrement sur les joints.[10]



Figure II-13 : Corrosion due aux infiltrations et parties saillantes (cordons de soudure)[10]



Figure II-14: L'osmose une année après[10]

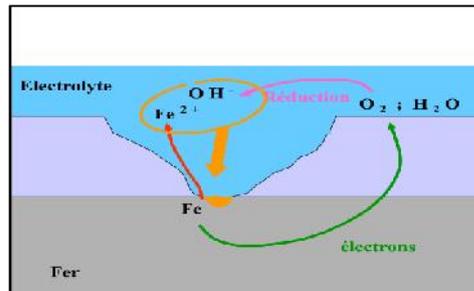


Figure II-15: l'explication chimique de corrosion[10]

II.6. Les moyens de protection

a) La protection passive: Les revêtements anti-corrosion.

b) La protection active: Le courant imposé.

II.6.1. La protection passive

Revêtement extérieur dont le rôle est de créer un effet de barrière électrique entre le métal des canalisations et le milieu environnant Ce revêtement ne constitue cependant pas une protection absolue et définitive en raison des imperfections ou blessures susceptibles de

Se produire lors de la pose ou au cours de la vie de l'ouvrage. C'est pourquoi on maîtrise ces risques potentiels par l'installation d'une protection cathodique. [11]

STOPAQ Revêtement viscoélastique



Figure II-16: Bande STOPAQ CSZ[11]



Figure II-17: Mastic STOPAQ CSZ[11]

Empêche la corrosion sur les cordons de soudure



Figure II-18: les opérations nécessaire pour éliminer la corrosion[11]

II.6.2. La protection cathodique (la protection active)

La protection cathodique, une protection active

La protection cathodique est la technique qui permet de conserver dans son intégrité la surface extérieure des structures en acier enterrées ou immergées, en s'opposant au processus électrochimique d'attaque du métal par le milieu ambiant, c'est-à-dire la corrosion.

Les réseaux en acier, même anciens et dégradés, peuvent bénéficier de cette technique dans des conditions économiques admissibles. [12]

II.7. La protection active

Principe

La vitesse de corrosion d'un métal dans le sol ou dans l'eau est fonction du potentiel E de ce matériau dans son milieu environnant. De manière générale, plus on porte le potentiel du métal vers des valeurs négatives, plus la vitesse de corrosion diminue. Cet abaissement de potentiel vers des valeurs plus négatives est obtenu en faisant circuler dans le sol ou l'eau un courant continu partant d'anodes et se refermant par la surface métallique de la structure à protéger. Dans le cas de structures revêtues, le courant atteint la surface métallique principalement par les porosités et les défauts du revêtement. Le courant de protection peut être fourni soit à partir de systèmes à courant imposé, soit à partir d'anodes galvaniques.

Critère de protection cathodique

Deux critères sont utilisés :

Critère : Le potentiel métal/solution

C'est le critère le plus utilisé. Le potentiel d'électrode de la structure pour lequel la vitesse de corrosion du métal est < 0.01 mm par an est appelé potentiel de protection E_p . Cette vitesse de corrosion est suffisamment faible pour qu'il n'y ait plus de dégâts dus à la corrosion.

Le critère de la protection cathodique est donc : **E E**

Le potentiel de protection d'un métal peut dépendre dans une certaine mesure, de la corrosivité de l'environnement (électrolyte), mais il dépend surtout du type de métal utilisé.

Il apparaît dans le diagramme de Pourbaix (diagramme pH- tension métal/solution) établi pour le fer, un domaine d'immunité où le fer reste à l'état métallique parce qu'il se trouve dans des conditions où seules des réactions cathodiques peuvent se développer. C'est le domaine de la protection cathodique.

On admet que toute structure en acier enterrée dont le potentiel est -850 mV par rapport à l'électrode Cu/CuSO₄, sera protégée cathodiquement.

Ce critère doit être porté à -950 mV si le sol est particulièrement compact et contient des bactéries sulfatoréductrices. [13]

* : Norme NF EN 12954 (2001)

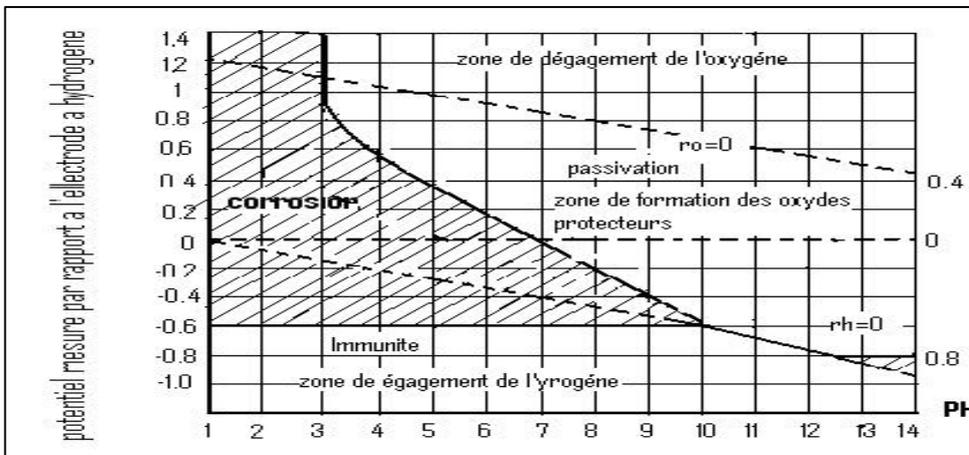


Figure II-19: Diagramme de Pourbaix pour le fer [13]

II.7.1. Type de la protection cathodique

Il existe deux manières de réaliser la protection cathodique :

- 1- Protection cathodique par anodes galvaniques (sacrificielles),
- 2- Protection cathodique par courant imposé.

1- Protection cathodique par anode galvanique

Le métal est relié électriquement avec un autre métal moins noble que lui, c'est-à-dire dont le potentiel dans la solution est plus négatif. Ce métal moins noble va se dissoudre par oxydation en émettant dans le sol un courant qui viendra protéger la structure. On a réalisé ainsi une protection cathodique dite par anode galvanique ou sacrificielle.

- Protection cathodique d'un métal par couplage galvanique

Principe : liaison électrique du métal à un autre métal électronégatif (moins noble)

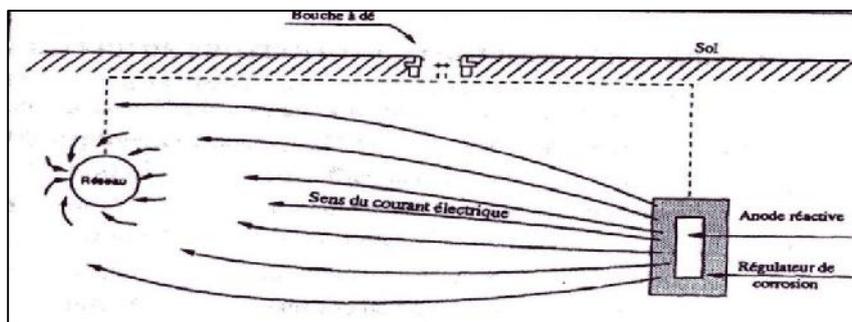


Figure II-20: Protection cathodique d'un métal par couplage galvanique [12]

Avant la liaison le potentiel $E_{anode} < \text{potentiel } E_{m\acute{e}tal}$

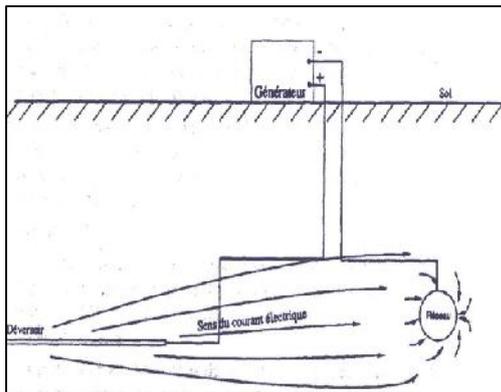
L'étude de protection cathodique détermine le nombre, le type et l'emplacement des anodes le long de la conduite à protéger en se basant sur les principaux paramètres suivants :

- Informations relatives à la structure à protéger (Diamètre, épaisseur, longueur),
- Information relative au revêtement,
- Nature des sols (résistivités),
- Type et caractéristiques des anodes.

Les anodes peuvent être utilisées soit dans la protection provisoire d'une conduite enterrées, soit dans sa protection définitive.

2-Protection cathodique par courant imposé

Un générateur appelée transformateur redresseur (ou poste de soutirage) débitera un courant continu imposé, circulant d'une pièce anodique appelée déversoir (ou anode déversoir) pour pénétrer dans le métal à protéger le rendant ainsi cathodique.



FigureII-21: Protection cathodique d'un métal par courant imposé soutirage[12]



FigureII-22: TUBE POLYÉTHYLÈNE EAU POTABLE[28]

- ANODE SACRIFICIELLE

Pour réaliser la protection cathodique des canalisations enterrées en acier, il suffira donc :

- soit de constituer une pile à l'aide d'un métal plus électronégatif que l'acier (magnésium ou zinc): c'est la protection par anode sacrificielle.

Principe : on crée un couple galvanique dont la canalisation métallique sera la cathode de la pile et l'anode un métal choisi pour son potentiel plus électronégatif (magnésium, aluminium, zinc).



Figure II-23: ANODE PRÉBACKFILLÉE [29]



Figure II-24: ANODE SACRIFICIELLE [29]

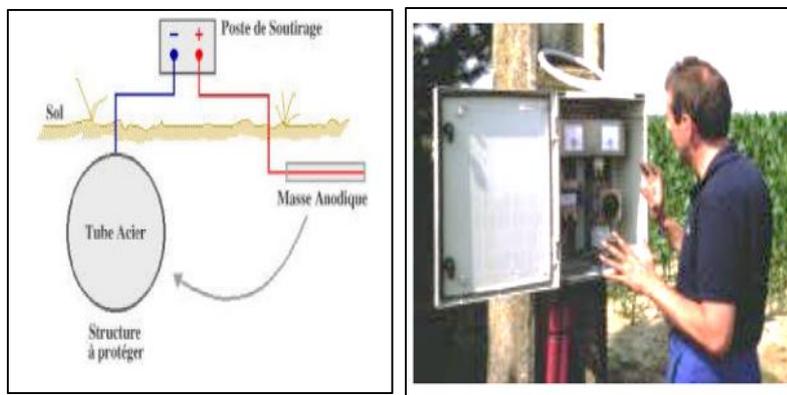


Figure II-25: Poste de soutirage (Un système actif et économique) [29]

II.7.2. Le soutirage de courant

- soit de les relier à une source électrique convenablement connectée de manière que l'acier devient la cathode du système et de vérifier que le potentiel de cette cathode atteint bien le critère de protection en tous points : c'est le soutirage de courant

Principe

L'abaissement de potentiel des canalisations à la valeur voulue est obtenu en connectant le réseau, en un ou plusieurs de ses points, au pôle négatif d'une source électrique de courant continu. Le champ électrique se répartit dans le sol, par la prise de terre ou déversoir. Les électrons gagnent la canalisation et pénètrent par leur surface latérale, cheminant longitudinalement dans les conduites jusqu'à la connexion au pôle négatif du redresseur.

Il en résulte un abaissement de potentiel dans le réseau. Cet abaissement de potentiel croît depuis les extrémités du réseau les plus éloignées de la connexion jusqu'au pôle négatif de l'alimentation pour être au maximum au droit de celle-ci. Il doit être suffisant pour que le critère de protection

soit partout atteint et maintenu Ce type de protection est utilisé surtout pour la protection des grands réseaux et offre une grande souplesse d'adaptation et de réglages. [12]



FigureII-26: DRAINAGE COURANTS VAGABONDS [12]

Les électrodes utilisées sont :

- électrode au calomel (laboratoire),
- électrode au sulfate de cuivre Cu/CuSO_4 (couramment utilisée),
- électrode au chlorure d'argent Ag/AgCl (eau de mer),
- électrode au zinc (eau de mer). [29]



Figure II-27: POINT DE MESURE [29]



Figure II-28: ELECTRODE [29]

II.8.Le soudage

Le soudage relève de la métallurgie : il faut connaître le matériau pour le souder de façon efficace. Cette connaissance est d'autant plus cruciale que l'ouvrage sera fortement sollicité. C'est pourquoi le soudage est régi par des cahiers des charges et des modes opératoires précis. Le soudage est une opération de micro-métallurgie consistant à exécuter un cordon fondu liant les bords de deux pièces. Il constitue un moyen d'assemblage privilégié pour toute construction faisant intervenir des matériaux métalliques.

II.8.1. Les types de soudage

- ➔ La soudure au chalumeau
- ➔ La soudure à l'arc électrique avec ou sans couverture de gaz inertes
- ➔ La soudure électrique par point ou par résistance (que nous ne décrivons pas)

1-Soudage au gaz ou au chalumeau

2-Soudage à l'arc électrique

3-Soudage manuel à l'arc électrique avec électrode enrobée



Figure II-29: circuit de soudage (fiche pratique de sécurité, Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées) INRS ED 83 [28]

(Comme dans le procédé de soudage oxyacétylénique, c'est le métal d'apport qui permet le soudage en créant le cordon de soudure).

L'enrobage produit au refroidissement une couche de laitier protégeant le cordon de soudure. Celui-ci sera « piqué » au marteau-burin, puis le cordon de soudure sera nettoyé et poli à l'aide de brosses, limes, meules... [15]

4 - la soudure de raboutage :

Gazoducs étudiés comportent des soudures longitudinales et des soudures circulaires de raboutage (les tubes sont assemblés bout à bout). L'étude traite principalement de la soudure de raboutage.

Le procédé de soudage utilisé pour les soudures de raboutage est le procédé **Gas-Métal Arc Welding (GMAW)** qui, conformément au handbook de l'ASM convient au soudage des aciers microalliés. Afin d'améliorer la qualité du soudage et d'accélérer les cadences, le procédé de soudage s'est progressivement automatisé.

- Pour les soudures de raboutage, la société FRONIUS en collaboration avec l'université de Cranfield et British Petroleum a mis au point un procédé de soudage pour assembler des tubes (>810MPa) jusqu'à 24 m de longueur et 52'' (1321 mm) de diamètre dans des conditions

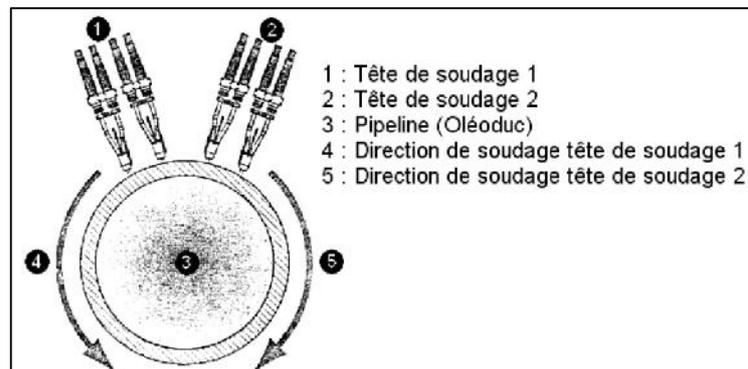


Figure II-30 : Du sommet du tuyau, les deux têtes tandem doubles soudent le pipeline de diamètre 1321 mm jusqu'au « point de rendez-vous » inférieur [19]

extrêmes (-50 °C). Il s'agit d'un système de soudage tandem avec quatre torches et deux fil-électrodes par torche, soit 8 électrodes. La vitesse de soudage des passes de remplissage peut atteindre 1300 mm/min (Figure II-30).

La société SERIMAX possède des machines Saturne® (Figure II-31) qui permettent de souder automatiquement les pipelines en extérieur dans des conditions extrêmes de température et d'humidité. Saturne est un procédé bitorche sous gaz actif Ar-CO₂. [18]

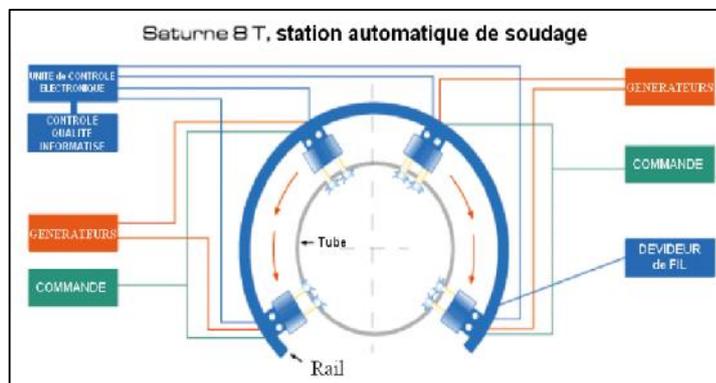


Figure II-31 : Procédé Saturne équipé de 8 torches [18]

Les soudures de raboutage des deux sociétés ont fait l'objet d'un article de Hammond, Blackman et Hudson lors de la Pipe Dreamer Conference [20].

Les soudures mono- et bi-torche sont réalisées par SERIMAX et les autres soudures sont réalisées par le WERC (Welding Engineering Research Centre) (Figure II-32).

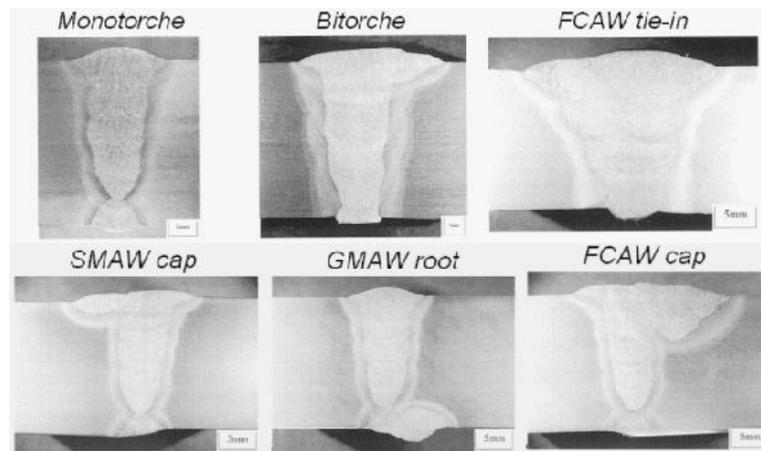


Figure II-32 : Coupes macroscopiques des soudures de SERIMAX et du WERC [19]

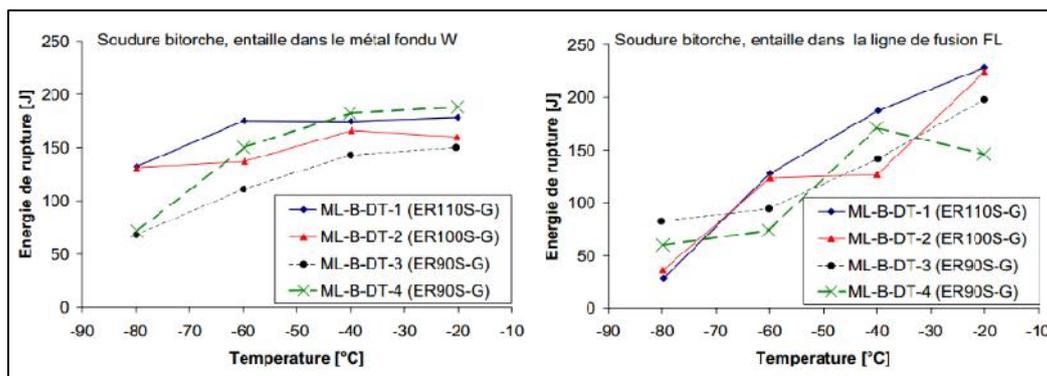


Figure II-33 : Résilience des soudures de raboutage entaillées dans le métal fondu (W) ou en ligne de fusion (FL) d'une soudure Bitorche, (FL) d'une soudure Bitorche [19]

II.9. La formation de la zone affectée thermiquement (ZAT)

II.9.1. Le cas du soudage monopasse

Pour mieux comprendre l'existence de la ZAT, considérons par exemple, le cas du soudage monopasse d'un acier à 0,15 % de carbone. Le diagramme de phases à l'équilibre utilisé ne permet pas de prévoir la nature des phases au voisinage de la ligne de fusion, mais permet de raisonner qualitativement sur les modifications structurales.

En se rapprochant du métal fondu, on trouve une succession de zones (Figure II-34) :

- Le métal de base ($T < A_c1$) n'ayant pas subi de transformation de phases.
- Une zone subcritique ($600\text{ °C} < T < A_c1$) où on ne constate pas de changement de phases, mais des phénomènes de revenu, recristallisation dans le cas de soudage sur produit écroui, vieillissement.
- Une zone de transformation intercritique ($A_c1 < T < A_c3$) où la ferrite se transforme en austénite.
- Une zone à fins grains ($A_c3 < T < 1100\text{ °C}$) où la transformation austénitique est totale.
- Une zone à gros grains ($1100 < T < 1495\text{ °C}$) où les grains austénitiques formés grossissent.
- Une zone de liaison entre le métal fondu et le métal de base, portée partiellement à l'état liquide, où coexistent une phase ferritique solide et une phase liquide.
- Le métal fondu, dont les germes se solidifient par épitaxie sur les grains de la ZAT.

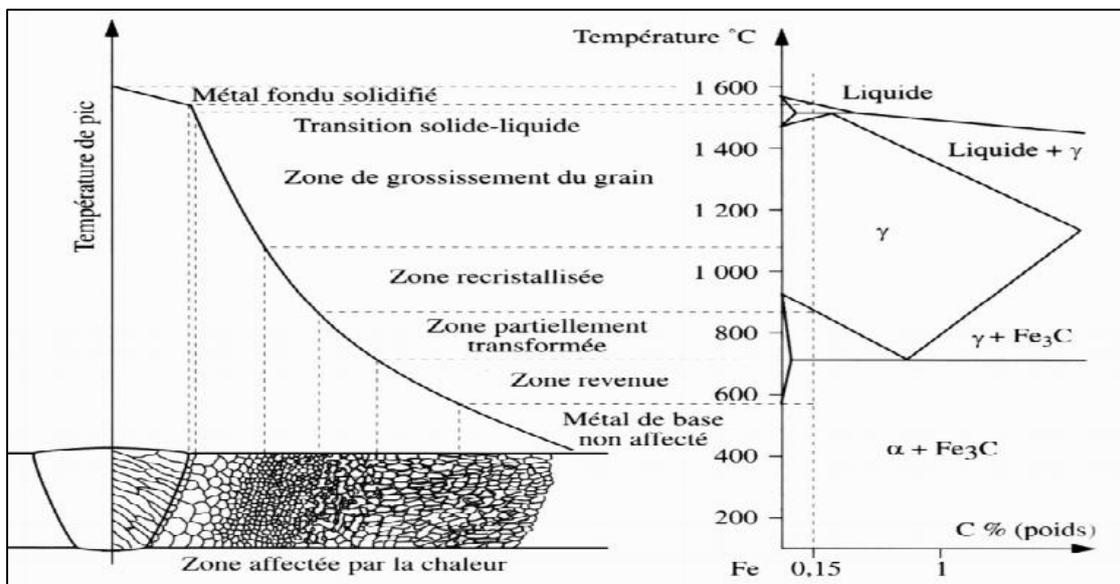


Figure II-34 : Présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé, [21]

II.9.2. Le cas du soudage multipasse

Dans le cas du soudage multipasse, les microstructures observées sont plus nombreuses.

Hormis le dernier dépôt, tous les points de la ZAT subissent une succession complexe de cycles de réchauffages.

Mais il faut savoir que le dépôt N+i a une influence métallurgique sur la passe N, seulement si la température maximale atteinte dépasse 500 °C et que l'austénisation à haute température « efface

» l'influence métallurgique des cycles précédents à température inférieure. D'après se résume à quelques combinaisons caractéristiques, comportant au plus trois pics thermiques.

II.10. Les six assemblages et leur soudage

Six configurations de tubes en acier X100 de diamètre extérieur 914 mm (36 pouces) soudés par SERIMAX sont étudiées (Tableau II-1) :

- 2 épaisseurs : 20.6 mm et 12.7 mm
- 3 types de soudage : monotorche, bitorche avec 50 mm et 100 mm entre les torches
- 1 fil d'apport pour les passes de remplissage : Elgamatic 135

Tableau II-1: Six tubes soudés Elgamatic 135 (dimension, côté de prélèvement, placement torches) .[23]

Notation soudure	Diamètre x épaisseur	Côté de prélèvement	Procédé de soudage MAG
2Mono	914 x 20,6 mm	bâbord	Monotorche
2B50		bâbord	Bitorche 50 mm
2B100		tribord	Bitorche 100 mm
1Mono	914 x 12,7 mm	bâbord	Monotorche
1B50		bâbord	Bitorche 50 mm
1B100		tribord	Bitorche 100 mm

L'entreprise SERIMAX utilise un procédé de soudage MAG (Métal Active Gas) de basse énergie ~ 0,3 kJ/mm. Ce procédé fut d'ailleurs le premier procédé GMAW automatique pour

II.10.1. Matériaux et choix

La construction des pipelines permettant un déplacement de deux torches à grande vitesse (Figure II-35). Il est d'ailleurs possible de faire 250 à 300 soudures par jour sur des tubes de 36

pouces de diamètre et d'épaisseur de 12,7 mm.

Le métal d'apport se présente sous forme de fil fusible dévidé par une ou deux torches espacées de 50 mm ou de 100 mm. Le bain de fusion est protégé par un mélange de gaz

Ar/CO₂. Les torches (origine et suiveuse) sont fixées sur un chariot qui suit les rails encerclant le tube.

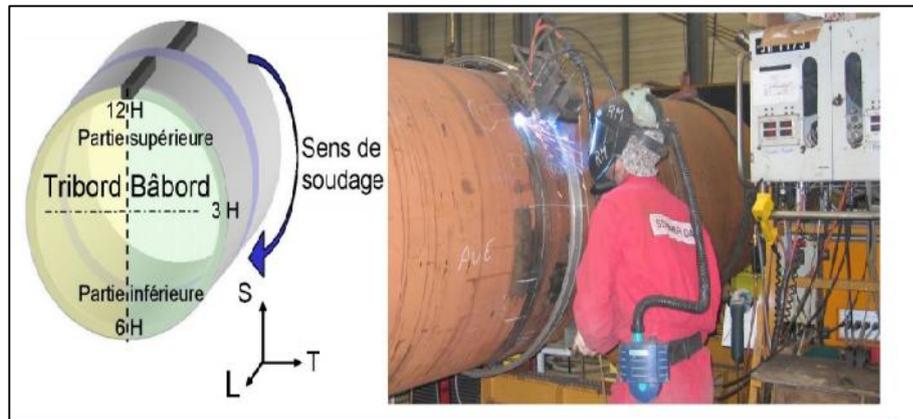


Figure II-35 : Procédé de soudage automatique MAG bitorche (Saturnax®), photo : D. Rollot, SERIMAX [23]

La Figure II-36 rassemble les macrographies dans le plan (LS) des soudures de rabouillage en fonction de l'épaisseur du tube (20.6 mm = 2 ou 12.7 mm = 1) et l'espacement entre les torches. On observe que la ZAT la plus large est celle formée par les procédés bitorche.

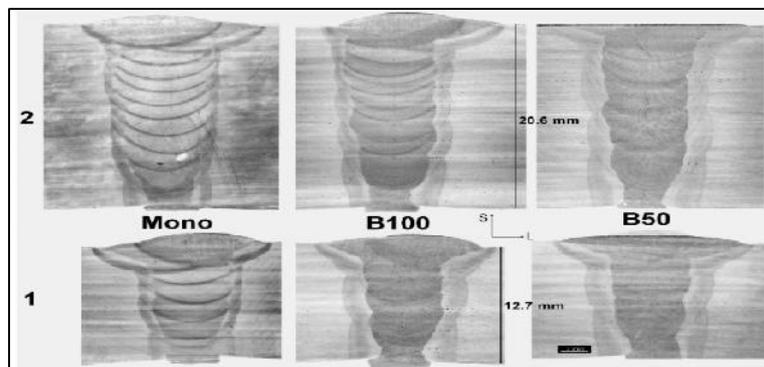


Figure II-36 : Allure des 6 soudures de rabouillage coupe LS et notations en gras [29]

-En général, la soudure hétérogène est composée de 3 zones principales (Figure II-39) :

- le métal de base (B) : l'acier X100 du pipeline ;
- le métal fondu (W) : dilution du métal d'apport et du métal de base fondu dans le chanfrein ;
- la zone affectée thermiquement (ZAT) : métal de base affecté par la chaleur lors du soudage.

La zone affectée thermiquement et le métal fondu sont séparés par la ligne de fusion F

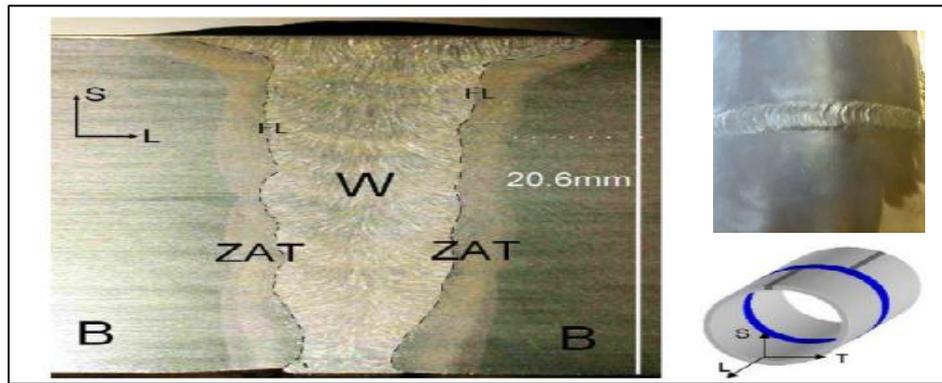


Figure II-37: Coupe macroscopique de la soudure de raboutage [25]

II.11. La ZAT de la soudure longitudinale W(L)

La soudure longitudinale (Figure II-40) est réalisée en deux fois, d'abord la passe interne et ensuite la passe externe. On voit sur la Figure II-15 que la passe interne a été modifiée par la passe externe.

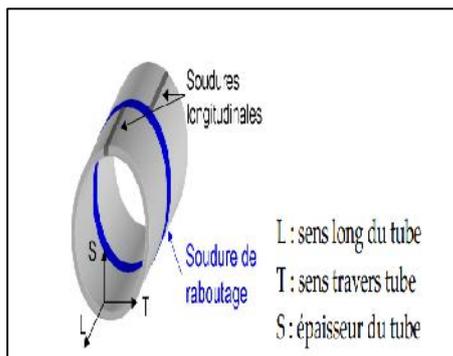


Figure II-38: Soudures du gazoduc et notations [25]

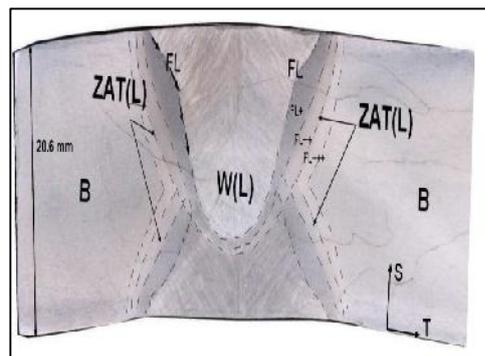


Figure II-39: Vue macroscopique d'une coupe de la soudure longitudinale, polie et attaquée Nital [25]

- On distingue trois ZAT différentes à l'œil nu qui sont arbitrairement appelées FL+, FL++ et FL+++ . Après mesure de la dureté, on remarque que la dureté de la ZAT(L) est plus basse de 10 % à celles du métal de base (B) et de la zone fondue W(L) (Figure II-42). [25]

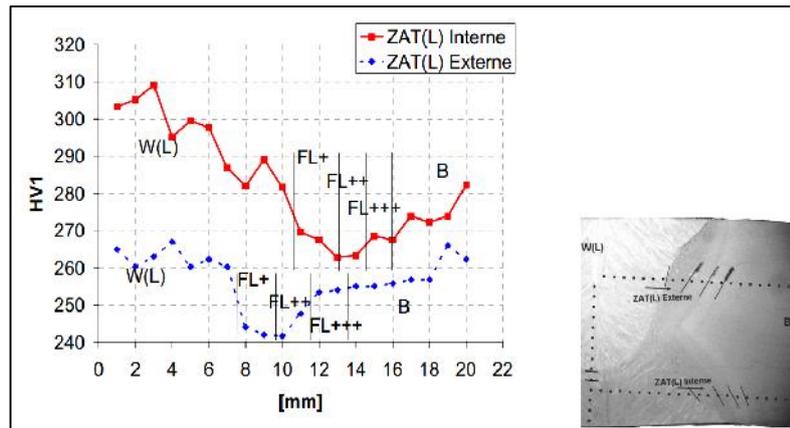


Figure II-40: Dureté partant du centre de la soudure longitudinale W(L) en direction de la ZAT, en interne et en externe [25]

II.11.1. La ZAT de la soudure en T – tube 2B50

La soudure en T est la jonction de la soudure longitudinale avec la soudure de raboutage.

Le choix a été de couper la soudure longitudinale en 2 dans le plan (LS). Les détails des profils de microdureté sont également. La ZAT de la soudure de raboutage, à droite sur la Figure II-43 est plus molle que la ZAT de la jonction en T, à gauche sur la Figure II-43.

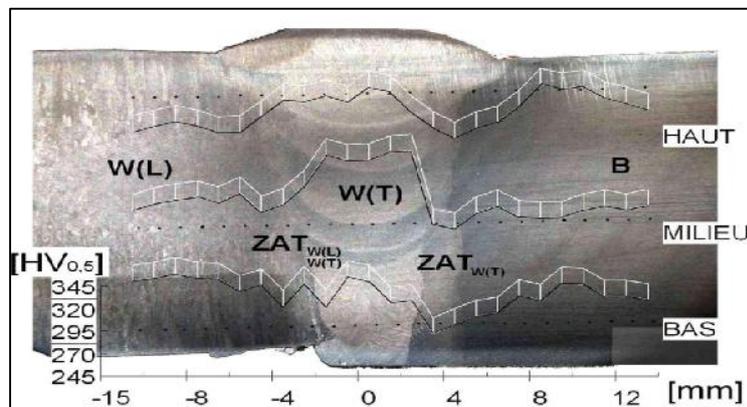


Figure II-41 : Empreintes de dureté dans la soudure en T (plan LS), macrographie + tendance 3D

La Figure II-41 dévoile le défaut de raccordement, dit high-low, qui provient de la difficulté à souder des tubes imparfaitement cylindriques bout à bout.

II.11.2. Exploitation des relevés de températures

L'instrumentation du soudage permet d'obtenir :

- la variation de la température maximale dans le temps.

-la variation de la température maximale en fonction de la distance à la ligne de fusion.



Figure II-42: Mesures de température en conditions réelles de soudage (bitorche, bride interne en cuivre) [25]

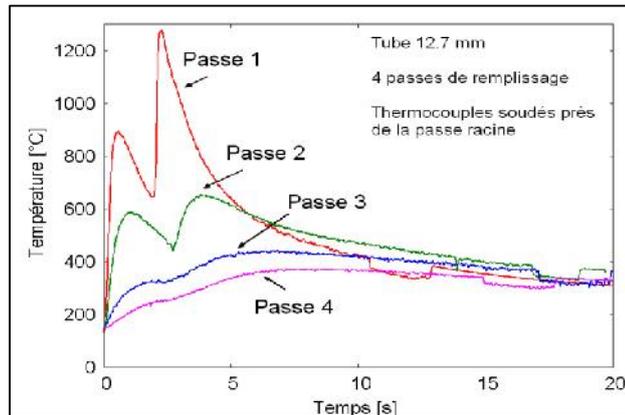


Figure II-43 : Enregistrement près de la peau interne lors des 4 passages du chariot bitorche [25]

La Figure II-42 présente le dispositif utilisé pour l'acquisition des cycles en conditions réelles.

Le chariot bitorche soude la virole usinée en circulant sur un rail fixé sur la périphérie du tube. Une entaille a été réalisée pour pouvoir percer les lamages et souder les thermocouples de type K de 0.3 mm de diamètre. La bride interne en cuivre qui permet habituellement de mettre les deux tubes bien en face est insérée ici pour retrouver des conditions thermiques similaires à celles du soudage réel. On suppose alors que l'entaille usinée pour les thermocouples, qui se situent à 40 mm de l'axe soudure n'a pas d'influence sur les cycles mesurés.

Equations de la thermique - Rykaline

La mise au point de la simulation de la zone affectée thermiquement nécessite la connaissance du cycle thermique du soudage à l'arc.

Nous utilisons la résolution de l'équation de la chaleur simplifiée, proposée par Rosenthal dès 1935, prolongée par Rykaline, Clyde et Adams .Ce modèle de dissipation thermique en trois dimensions s'applique au soudage à l'arc d'un tube épais (écoulement radial de la chaleur).

L'apport énergétique H du soudage à l'arc est :

$$H = \frac{VI\eta}{v} \quad (II.21)$$

Où V est la tension de l'arc électrique en volts, I est l'intensité de l'arc en ampères, η est le coefficient d'efficacité énergétique du procédé et v est la vitesse de déplacement de l'arc en

m/s. L'énergie est principalement dissipée par conduction. Le coefficient d'efficacité énergétique dépend du rendement thermique P et de la géométrie du dépôt et de l'assemblage G : $G = P \times G$.

La conductibilité thermique (J.m-1.K-1.s-1) est supposée constante en un point de coordonnées (x,y,z), dans le plan de la tôle, le chauffage est décrit par :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \left[\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right] \quad (II.22)$$

Où T est la température, t est le temps, $k = \lambda / (\rho \cdot C)$ est la diffusivité thermique (m².s-1) avec

La densité et C la chaleur spécifique.

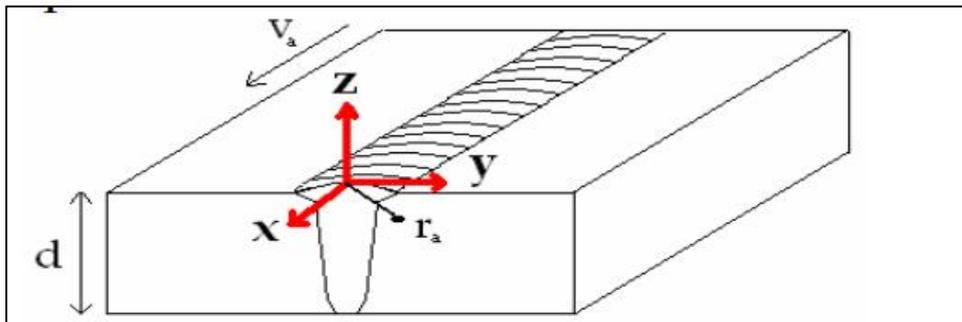


Figure II-44 : Définition du système de coordonnées, où une source de chaleur se déplace à une vitesse constante.[23]

On peut définir un système de coordonnées mobiles lié à la source (Figure II-44) en posant :

$$T(t)-T_0 = \theta_1 \frac{\Delta t_{T1}^{T2}}{t} \exp \left(-\frac{\Delta t_{T1}^{T2} \theta_1}{e(T_P-T_0)t} \right) \quad (II.23)$$

de manière à résoudre l'équation (II-23) dans le plan de la tôle où l'origine est la source de chaleur, on obtient alors pour une dissipation de la chaleur tridimensionnelle :

$$\theta_1 = \left(\frac{1}{T_1-T_0} - \frac{1}{T_2-T_0} \right)^{-1} \quad (II.24)$$

$$\theta_1 = 933.3 \text{ avec } T_0 = 100^\circ\text{C}, T_1 = 500^\circ\text{C}, T_2 = 800^\circ\text{C}$$

Où T_0 est la température de préchauffage.

Le cycle thermique subi en un point par le métal de base s'exprime ainsi :

$$\xi = X - V_a \cdot t, \quad r_a^2 = \xi^2 + y^2 + z^2 \quad (II.25)$$

Avec

T_p est la température du pic du cycle thermique, $e^{-\ln(10)}$

$$T - T_0 = \frac{H \cdot v_a}{2\pi\Gamma r_a} \exp\left(-v_a \frac{\xi}{2k}\right) \exp\left(-v_a \frac{r_a}{2k}\right) \quad (\text{II-26})$$

$T_0 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, température de préchauffage,

$t =$ le temps,

$\Delta t_{T_1}^{T_2}$ est le temps de refroidissement entre T_2 et T_1

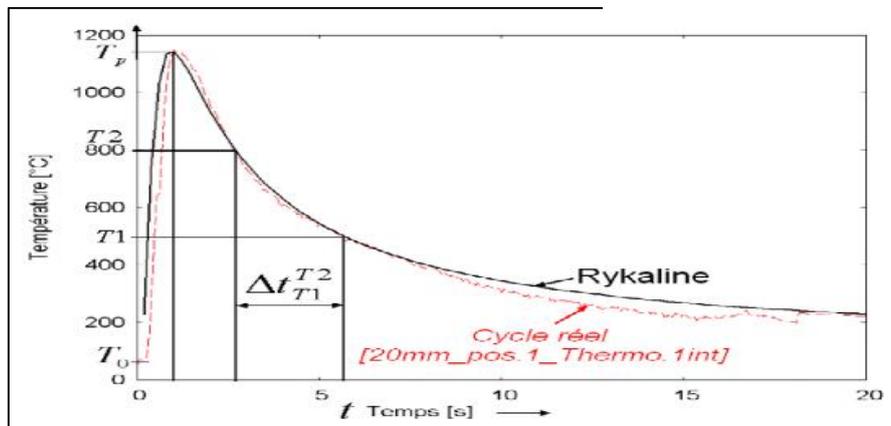
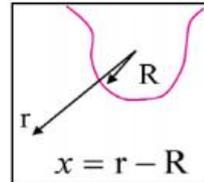


Figure II-45 : L'équation (II-23) de Rykalin ajustée sur la température mesurée à 1.5 mm de FL [23]

L'équation (II-24) de Rykalin donne la relation entre la température et le temps et représente très bien l'allure des cycles thermiques mesurée en conditions réelles (Figure II-45). Le Tableau II-3 donne la valeur des paramètres utilisés pour représenter les cycles réels.

Tableau II-3: Paramètres ajustés pour l'équation de Rykalin (II-24) [23]

Acquisitions	Tmax (°C)	DT800-500 (s)	$\Delta t_{T_1}^{T_2}$	$\frac{T_2 - T_0}{T_1 - T_0}$
12-1-pic2-int	1284	3.04	2.3	150
12-2-pic2-int	1275	3.50	2.3	150
20-1-pic2-int	1148	2.88	2.3	150
20-2-pic2-int	1080	2.90	2.7	150
X100-803050	1275	17.16	17.0	50

Par exemple, 12-1-pic2-int correspond au cycle thermique relevé par un thermocouple placé proche de la peau interne du tube de 12mm d'épaisseur en position 1 lors du passage de la 2^{eme} torche. [23]

II.11.3. Calcul de la température en un point de la soudure

La température de pic est évaluée à l'aide des conditions de soudage, du rendement, de la géométrie, et de la distance (x) mesurée à l'aide des informations sur la hauteur des passes et le placement des thermocouples. L'équation (II-27) donne la relation entre la température maximale et la distance à la ligne de fusion

$$T_{max}(x) = T_0 + \frac{1}{\frac{\pi \epsilon \rho C}{2q/v} \times (x^2 + 2Rx) + \frac{1}{T_f - T_0}} \quad (II-27)$$

R = 3.5 mm, rayon d'une passe

x distance entre le thermocouple et la ligne de fusion

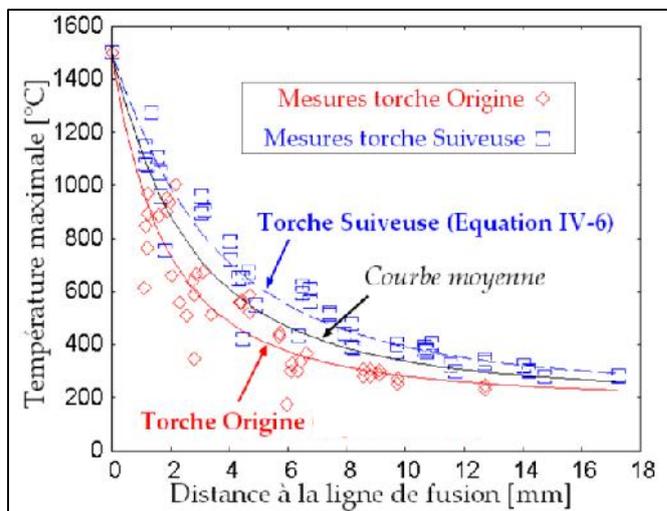
TF = 1500 °C

= 7900.10⁻⁹ kg.mm⁻³

C = 490 J.kg⁻¹.K⁻¹

T0 = 100 à 200°C

q / v = énergie de soudage



Paramètres utilisés :

- T₀₁ = 189 °C
- T₀₂ = 211 °C
- q1/v1 = 0.278 kJ.mm⁻¹
- q2/v2 = 0.589 kJ.mm⁻¹
- T0 moyen = 200 °C
- (q/v)moyen = 0.433 kJ.mm⁻¹

Figure II-46 : Température maximale de pic en fonction de la distance à la ligne de fusion pour un tube en acier à haute limite d'élasticité, issu des acquisitions sur cycles réels [23]

Les paramètres utilisés pour caler les courbes sur les mesures relatives aux cycles réels sont très proches de la réalité. La température de préchauffage est estimée à 200 °C, alors qu'elle évolue de 100 à 180 °C. L'énergie de soudage est calculée à 0.43 kJ.mm⁻¹ ce qui est la moyenne des énergies utilisées sur cycles réels.

La Figure II-46 nous permet de connaître la température de pic vue par le métal de base à une distance précise de la ligne de fusion. Par exemple, à 1,5 mm de la ligne de fusion cette température est d'environ 900 °C. Nous pourrions donc utiliser cette température pour simuler la zone à fins grains Fs avec le simulateur thermomécanique.

Présentation du dispositif

La machine Gleeble ou simulateur thermomécanique permet de reproduire des cycles thermiques représentatifs des cycles du soudage réel.



Figure II-47 : Simulateur thermomécanique Gleeble et son rack de contrôle et d'acquisition [24]

Elle est constituée d'un rack de commande et d'acquisition piloté par un logiciel et d'un système régulé en température et en charge (Figure II-47).

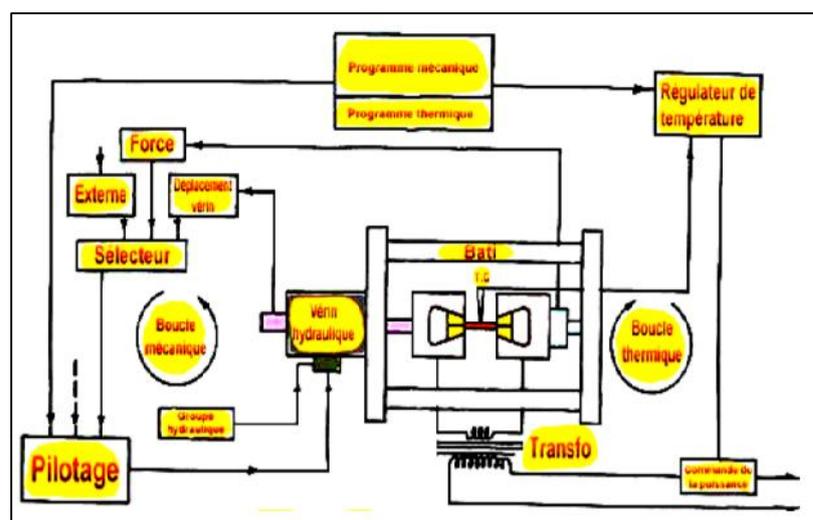


Figure II-48 : Asservissement en température et en charge (Alain NASLOT) [24]

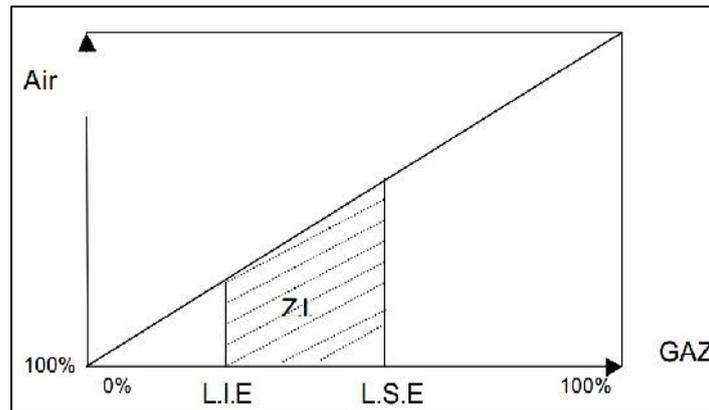


Figure II.49 : Zone d'inflammation (Z.I.) [24]

La résistance au passage du courant produit un échauffement de l'ébauche sur une zone uniforme d'environ 6 mm. Les mors en cuivre continûment refroidis permettent d'accélérer le refroidissement. La température de la section chauffée est contrôlée par un thermocouple de type K soudé sur l'ébauche et connecté à la carte d'acquisition. Le vérin mobile à gauche réglé par l'asservissement en charge permet de conserver une charge nulle dans l'éprouvette lors de sa dilatation thermique. [24]

II.12. Les Risques dus au gaz

II.12.1. Prévention des dangers :

Le stockage, la distribution et l'utilisation de gaz combustibles, peuvent présenter des risques, spécifiques au gaz considéré :

- L'explosion (déflagration ou détonation) du mélange air-gaz,
- l'asphyxie par manque d'oxygène,
- l'intoxication par les produits de combustion (oxyde de carbone).

Indépendamment de ces risques, les gaz, sous forme liquide ou gazeuse, peuvent également être à l'origine d'atteintes à l'environnement.

La présente présentation a pour but de caractériser ces différents risques et d'évoquer les moyens pouvant être mis en œuvre pour prévenir les dangers qui peuvent en résulter.

Les limites d'inflammations ou d'explosivités.

a. Définitions.

- **Limite inférieure d'inflammation ou d'explosivité (LIE ou LII) :** La LIE d'un gaz ou d'une vapeur est la concentration minimale au-dessus de laquelle il peut être enflammé.
- **Limite supérieure d'inflammation ou d'explosivité (LSE ou LSI) :** La LSE d'un gaz ou d'une vapeur dans l'air est la concentration maximale au-dessous de laquelle il peut être enflammé.

Zone d'inflammation (Z.I.): C'est la zone dangereuse, elle est le domaine des compositions comprises entre la LIE et LSE (zone en jaune).

-Point d'auto inflammation : C'est la température à laquelle un corps émet des vapeurs qui, mélangées à l'air s'enflamment spontanément.

- Energie d'activation : Lorsqu'un mélange inflammable n'est pas à sa température d'auto inflammation, une énergie extérieure dite d'activation est nécessaire pour démarrer la combustion.

II.12.2.Explosion et détection des risques d'explosion :

Définitions :

- l'atmosphère explosive, qui est un mélange avec l'air, dans les conditions atmosphériques, de substances inflammables sous forme de gaz, vapeurs, brouillards, brumes dans des proportions telles qu'une température excessive ou des arcs ou des étincelles produisent son explosion (le danger existe réellement).

Une atmosphère explosive, peut également être formée par des particules en suspension dans l'air.

- L'atmosphère explosible, qui est une atmosphère susceptible de devenir explosive (ce danger existe à l'état potentiel).

Température d'auto-inflammation

C'est la température minimum nécessaire, en l'absence de toute flamme, pour enflammer et entretenir la combustion d'un mélange combustible

II.12.3.Appareils de détection des gaz :

Les différents types d'appareils de détection :

Il en existe plusieurs types, reposant sur des principes différents et dont les caractéristiques les destinent à utilisations spécifiques.

a- Détecteurs portatifs :

Les appareils utilisés doivent être autorisés d'emploi.

- l'explosimètre (fonction explosimétrie) :

Basé sur le principe de la combustion sur filament, il prend en compte tout gaz combustible (non spécifique à un gaz). Il est utilisé pour mesurer des concentrations inférieures à la L.I.E

(indication en pourcentage de la L.I.E). Il doit :

- être étalonné sur l'un des gaz en présence desquels la réponse de l'appareil est parmi les plus faibles (déviation minimale). Ceci conduit généralement à retenir l'hexane ou le pentane comme gaz d'étalonnage.

Cette sécurité "positive" fait que le détecteur de gaz indique un danger maximal et non une valeur exacte. Ce n'est que lorsque le gaz détecté est connu avec certitude, cas des étalonnages ou des contrôles d'étalonnage par exemple, que l'on peut appliquer le coefficient correspondant à ce gaz à la valeur lue sur l'appareil ;

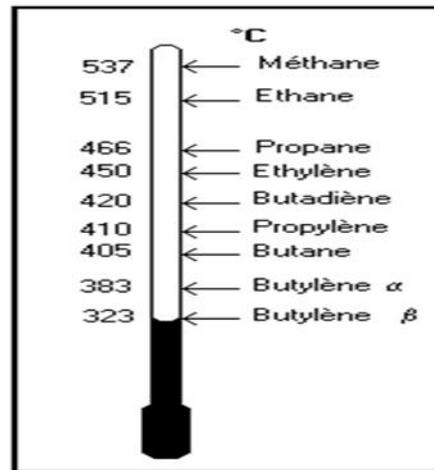
- être équipé d'un dispositif permettant de lever le doute en cas d'utilisation en atmosphère à forte teneur en gaz.

Le catharomètre (fonction catharomètre) :

Basé sur le principe de la conductibilité thermique, il réagit, à la présence d'un gaz (spécifique à un gaz). Sa sensibilité est plus faible que l'explosimètre et peut être utilisé pour des concentrations allant jusqu'à 100 % de gaz (indication en % de gaz).

b-L'appareil à ionisation de flamme :

Il repose sur le principe de la conductibilité électrique engendrée au sein d'une flamme par un mélange gazeux. Il détecte tous les hydrocarbures et il est particulièrement sensible. [26]



FigureII-50 : la température d'auto-inflammation [26]



FigureII-51 : loniflam [26]



FigureII-52 : explosimètre [26]

II.12.4. Quelque accident réel :



FIGURE II.53 : des accidents réels en kanada[10]

Chapitre III : étude
numérique d'un modèle
conduite avec intersection

III.1 Présentation du modèle étudié

Dans cette étude, le modèle montré, dans les deux figure III.1 et III.2 est un tube principal (réservoir) cylindrique est percé radialement par un petit tuyau à un point sur son axe à distance de l'extrémité de la grande pipe. L'intérieur du réservoir contient un fluide à une température (400°C) à une de pression variante entre 0.2 et 0.8 bar, le petit tuyau contient un fluide à une température (10°C) et avec la même pression du réservoir. Le Coefficient de convection dans le réservoir et le tuyau soit 1200 Watts/m² °C, tandis que le coefficient de convection à l'extérieure de la géométrie sous une température de 20 °C est 50 Watts /m² °C.

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide Le Matériaux utilisés dans cette étude est de l'aluminium dont les caractéristiques physiques sont données dans les tableaux III.1 et III.2

Propriétés physique et mécanique d'aluminium à différentes températures sont citées sur le tableau III-1 :

Tableau III.1 : Propriétés physique d'aluminium à différentes température [26]

Température (°C)	Conductivité thermique (W/m°C)	La densité (Kg/m ³)	Dilatation thermique 10 ⁻⁶ (Pa)	Chaleur spécifique J/Kg°C	Module de Young E (Pa)	Coefficient de poisson	Limite élastique Mpa
0	204	2700	84.2	880	69 10 ⁹	0.33	350
20	/	2700	84.2	880	69 10 ⁹	0.33	350
300	225	2700	84.2	880	69 10 ⁹	0.33	350

Propriétés physique et mécanique d'acier inoxydable 304 L à différentes températures sont citées sur le tableau III-2 :

Tableau III.2 : Propriétés physique de l'acier inoxydable 304 L à différentes température [26]

Température (°C)	Conductivité thermique (W/m°C)	La densité (Kg/m ³)	Dilatation thermique 10 ⁻⁶ (Pa)	Chaleur spécifique J/Kg°C	Module deYoung E (Pa)	Coefficient de poisson	Limite élastique (Mpa)
20	14.54	7889	15.3	473	195 10 ⁹	0.33	230
300	17.81	7889	16.4	524	195 10 ⁹	0.33	230

Dans cette étude, le modèle étudié dans notre calcul, est présentés sur la figure (III-1), c'est une jonction entre deux tubes en T.

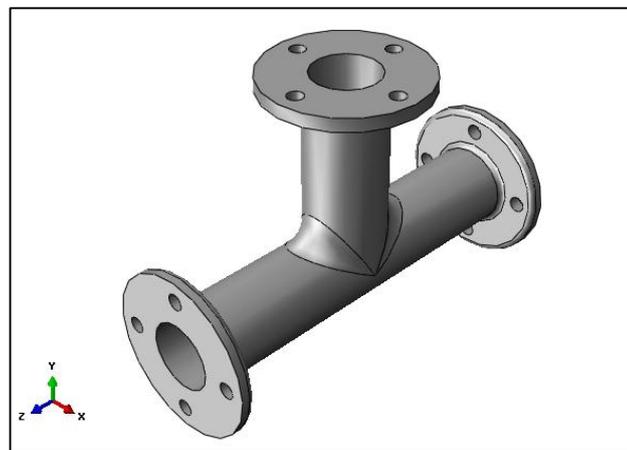


Figure III-1 Géométrie en T jonction

III.2.Présentation du code de calcul

Les simulations des essais thermomécaniques ont été réalisées à l'aide du code en éléments finis "ABAQUS 6.9".

La méthode des éléments finis est un moyen d'étude très utilisé actuellement ; elle consiste à calculer, après division d'un système en éléments, les variables inconnues pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques. Ces équations peuvent modéliser, moyennant des hypothèses simplificatrices, les problèmes de la mécanique des solides.

Pour mener notre étude par modélisation numérique, on a utilisé le logiciel numérique ABAQUS, qui est l'un des codes de calcul, basé sur la méthode d'éléments finis.

Le logiciel « ABAQUS » comprend plusieurs composantes telles que : With CFD Model, With Standard/Explicit Model. Chaque composante est destinée à l'un des domaines d'ingénierie, et son choix met automatiquement à la disposition de l'utilisateur les processus adéquats (type d'élément, conditions aux limites, tracés,...etc.). Dans notre analyse, on a utilisé les modules statique général et heat Transfer dans ABAQUS With Standard/Explicit Model, qui permet de traiter la majorité des problèmes de mécanique et des transferts de chaleur. Il offre des outils puissants pour l'analyse en deux et trois dimensions, On trouve dans le manuel d'aide de « ABAQUS » toutes les instructions qui permettent son exploitation à travers son interface utilisateur graphique "Graphical User Interface" ainsi que toute la documentation nécessaire. de nombreux processus de calcul sont disponibles dans ce code et chaque processus est une sorte d'ensemble de fonctions qui effectuent une tâche spécifique.

III.3. Les Conditions initiales et Les conditions aux limites :

Les jonctions en T et Y représentées sur les figures précédente ont été retenus sur trois extrémités par six degrés de liberté (3 translations et 3 rotations) alors on a éliminé le déplacement indépendamment à toutes les directions. Les conditions initiales et Les conditions aux limites utilisées, sont comme suit : (U_x , U_y et U_z les composantes des déplacements dans les trois directions x, y et z respectivement). Ces conditions sont représentées sur la Figure III-2

Ces conditions aux limites sont appliquées sur les deux études mécanique et thermique.

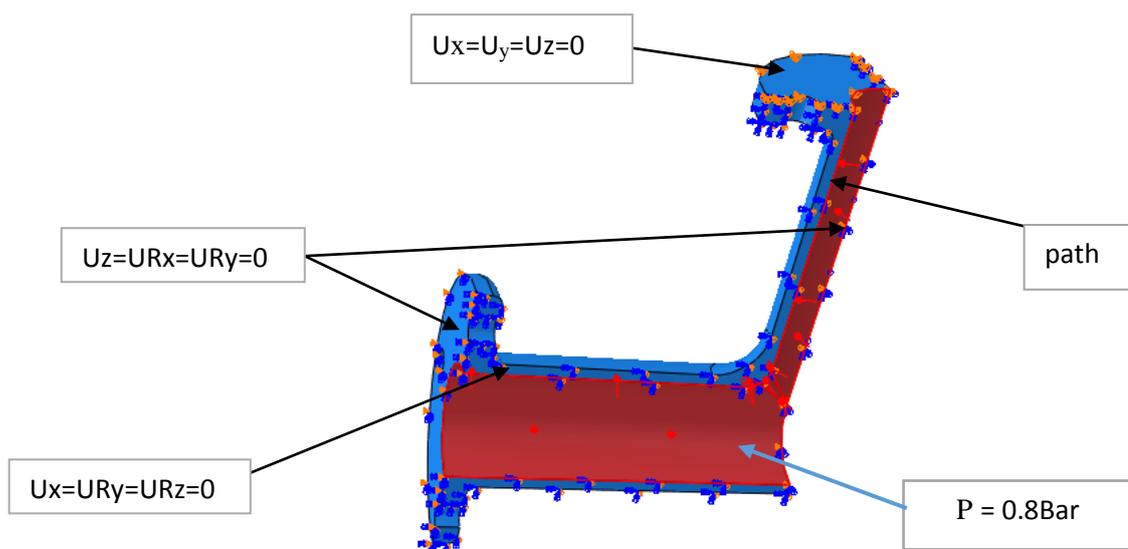


Figure III-2 Les conditions aux limites appliquées sur ABAQUS

- **Maillage de la géométrie :**

La méthode des éléments finis repose sur un découpage de l'espace selon un maillage. D'habitude l'on choisit un maillage carré ou triangulaire mais rien n'interdit de choisir des maillages plus complexes. Il n'est pas non plus nécessaire que le maillage soit régulier et l'on a tendance à resserrer le maillage près des endroits d'intérêts (par exemple aux endroits où l'on pense que la solution va beaucoup varier), cependant il faut veiller à avoir des éléments faiblement distordus (se rapprocher d'un polygone régulier). Plus ce maillage est resserré plus la solution que l'on obtient par la méthode des éléments finis sera précise et proche de la « vraie » solution de l'équation aux dérivés partielles.

Même si une structure géométriquement complexes peuvent être maillées avec des éléments tétraédriques, elles mai exigent de nombreux éléments et que mai conduire à l'échec parce que la simulation des ressources informatiques. Même un volume de forme régulière mai exigent de nombreux éléments tétraédriques si elle a un ratio très grand aspect. Ici, les éléments hexaèdres ou d'un coin serait un meilleur choix. (Figure III.3) "Objet avec un aspect ratio Large", illustre cette différence. Il montre que le nombre d'éléments tétraédrique (a) est beaucoup plus grand que le nombre d'éléments hexaédrique (b), si une densité de maillage similaire est maintenue sur la section transversale.

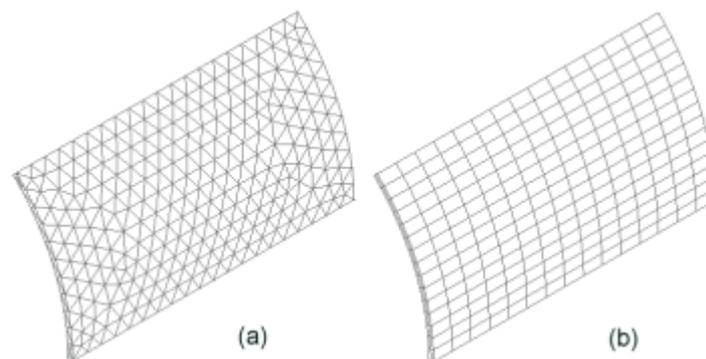


Figure III-3a) éléments tétraédrique, b) éléments hexaédrique

Pour la modélisation en trois dimensions des structures solides nous avons utilisés des éléments tétraédriques avec des nœuds linéaires. L'élément est défini par dix nœuds ayant trois degrés de liberté à chaque nœud: la translation dans les z nodale x, y et les directions. La géométrie, la position des nœuds, et le système de coordonnées pour cet élément sont indiqués dans la (Figure III.4).

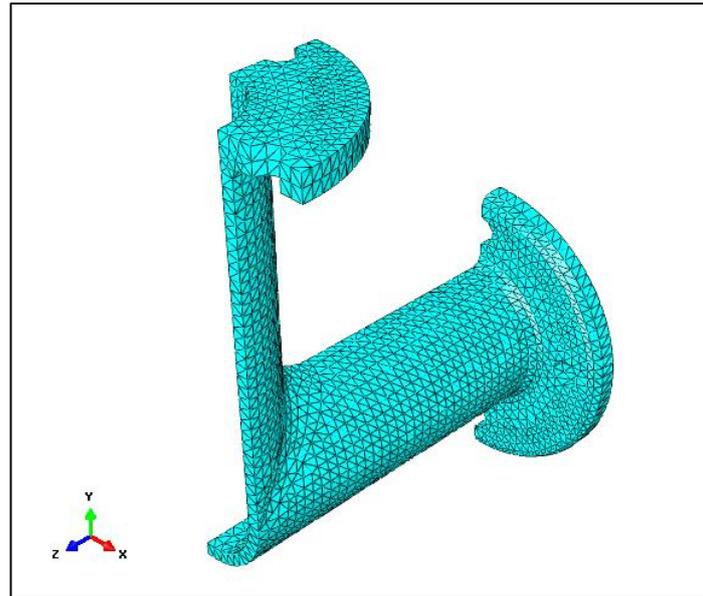
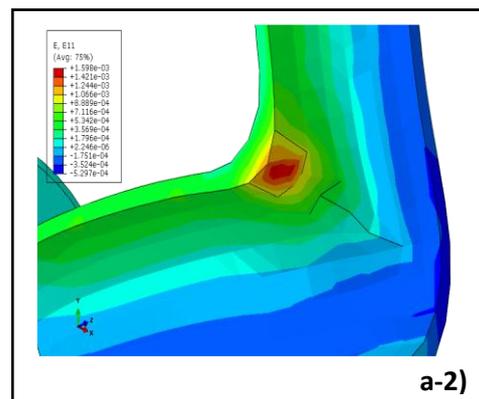
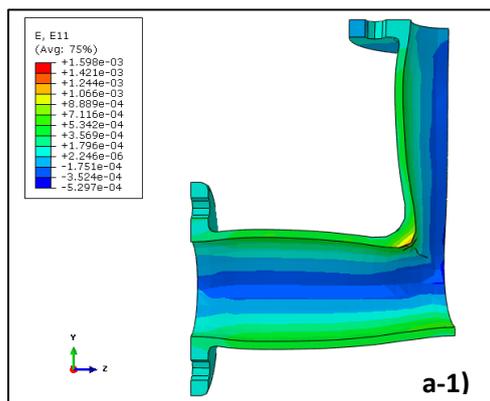


Figure III-4 Maillage de la jonction T sous ABAQUS

III-4 Résultats et discussion

a) Cas de chargement mécanique :

Les figures III.6 (a,b et c) représentent les déformations suivant les trois directions x, y et z respectivement de la jonction T en Aluminium pour une pression interne de 0.8 bars . On constate que la plus grande déformation est localisée juste à l'intersection (suivant x). Les figure III.7 et III-8, montre l'évolution de la contrainte et de ladéformation de la même jonction. On peut remarquer que le maximum de la contrainte est atteint suivant la direction (x). Ce qui est bien visible sur la figure III-8 de la déformation élastique.



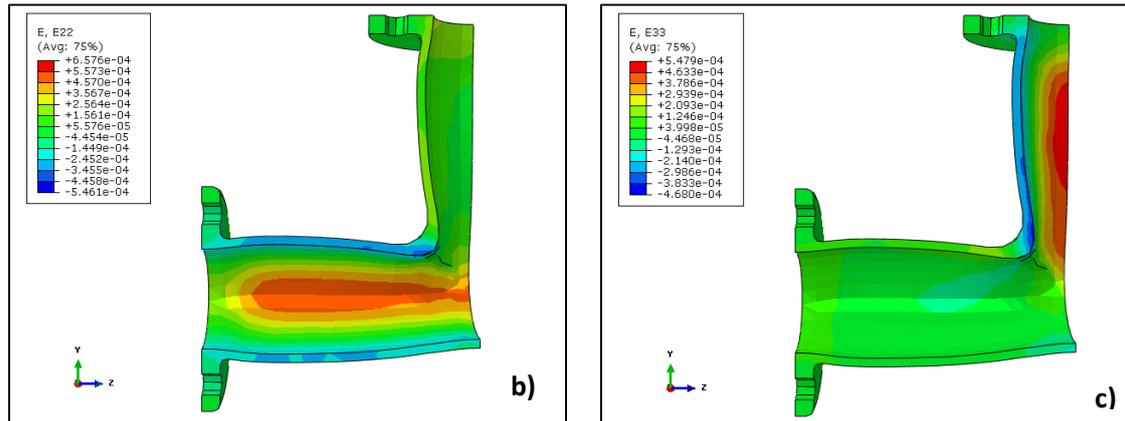


Figure III-6 Distribution de la déformation sur T-jonction en Al suivant les axes x, y et z

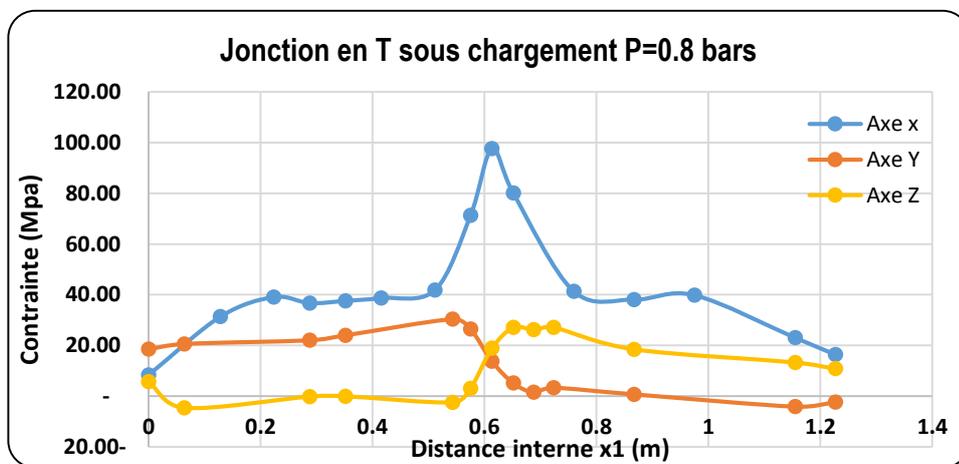


Figure III-7 Variation de la contrainte en T-jonction en Al suivant les axes x, y et z

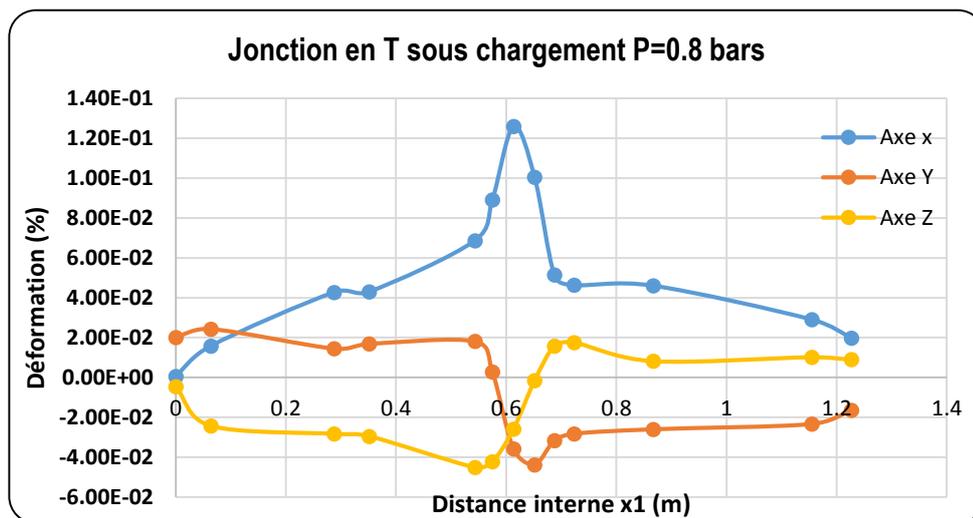


Figure III-8 Variation de la déformation en T-jonction en Al suivant les axes x, y et z

Les figures III.9 (a,b et c) représentent les déformations suivant les trois directions x, y et z respectivement de la jonction T en 304L, pour une pression interne de 0.8 bars .Pareil comme le cas de la jonction en aluminium, la plus grande déformation est localisée juste à l'intersection (suivant x). Lesfigure III.10 montre l'évolution de la contrainte suivant la distance interne ; On peut remarquer que le maximum de la contrainte est atteint suivant la direction (x) avec une valeur dépassant les 120 Mpa par contre dans le cas de la jonction en aluminium la contrainte maximale atteinte est de 100 Mpa, cela due à la nature de la résistance des deux matériaux.

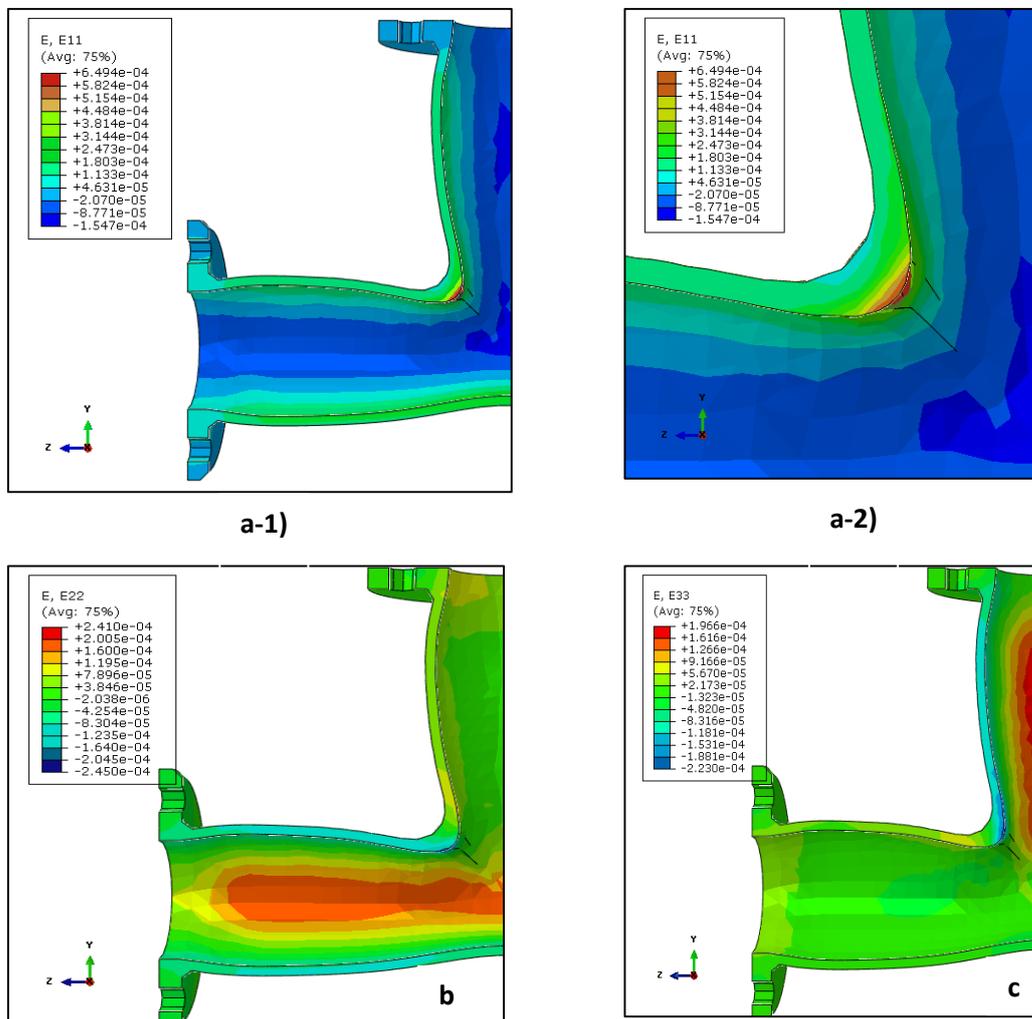


Figure III-9 Distribution de la déformation sur T-jonction en 304L suivant les axes x, y et z

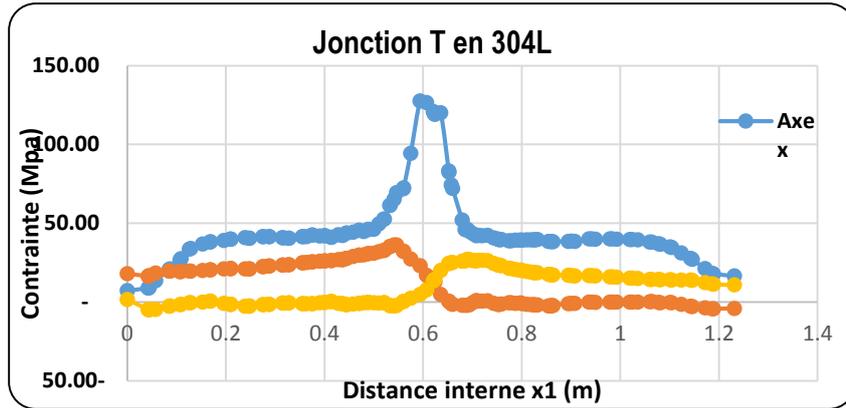


Figure III-10 Variation de la contrainte en T-jonction en 304L suivant les axes x, y et z

b) Cas de chargement Thermique :

La distribution nodale de la température et de la déformation thermique sont représentées sur la figure III-11. On observe que la variation de température commence à l'approche de la zone d'intersection, où le fluide chaud et froid se rencontre, c'est ce qu'on remarque à la figure. Les vecteurs de flux et le gradient thermique sont colinéaires et de sens inverse (matériau isotrope).

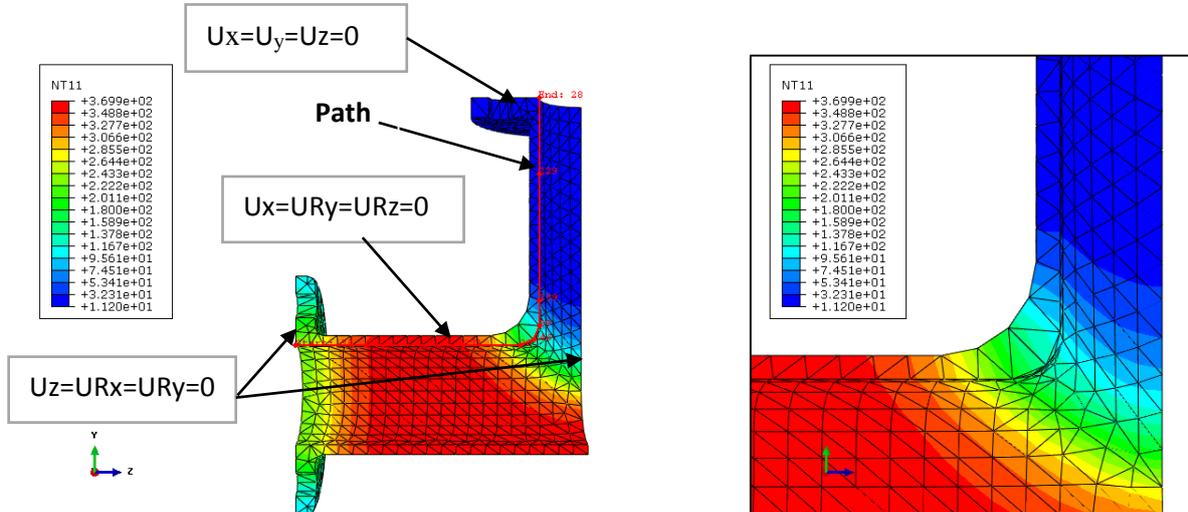


Figure III-11 Distribution nodale de la température pour une jonction T en Al

La figure III-12 montre l'évolution de la température nodale dans les trois directions (x, y et z) en fonction de la distance du chemin défini par Path sur la figure III.11. Ainsi, on remarque que la température commence avec une valeur de 240°C puis elle se stabilise à $T=363^{\circ}\text{C}$ et s'approche de l'intersection où elle diminue progressivement jusqu'à $T=194^{\circ}\text{C}$ où on a déterminé la déformation élastique maximale $\epsilon_{\text{max}} = 0.13\%$ qui a une signification

importante car c'est cette distance qui représente l'intersection entre les deux fluides et les deux tuyaux. Ensuite la température se stabilise à la valeur $T=11^{\circ}\text{C}$.

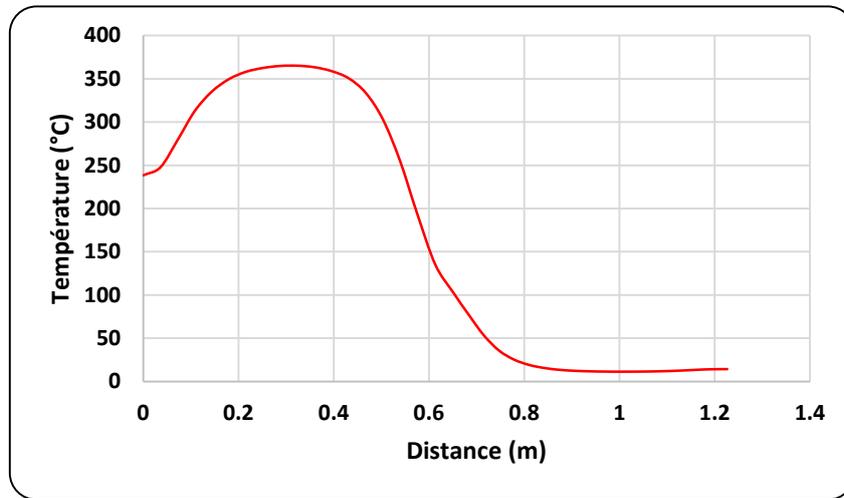


Figure III-12 Variation de la température en fonction de la distance

La figure III-13 (a,b) montre les contours du flux de chaleur suivant les trois directions (x, y et z) pour deux cas de jonction en Aluminium et en acier inoxydable, on constate que le flux atteint une valeur maximale juste à l'intersection pour les cas de jonction sauf que pour l'acier 304L, la valeur maximale est importante.

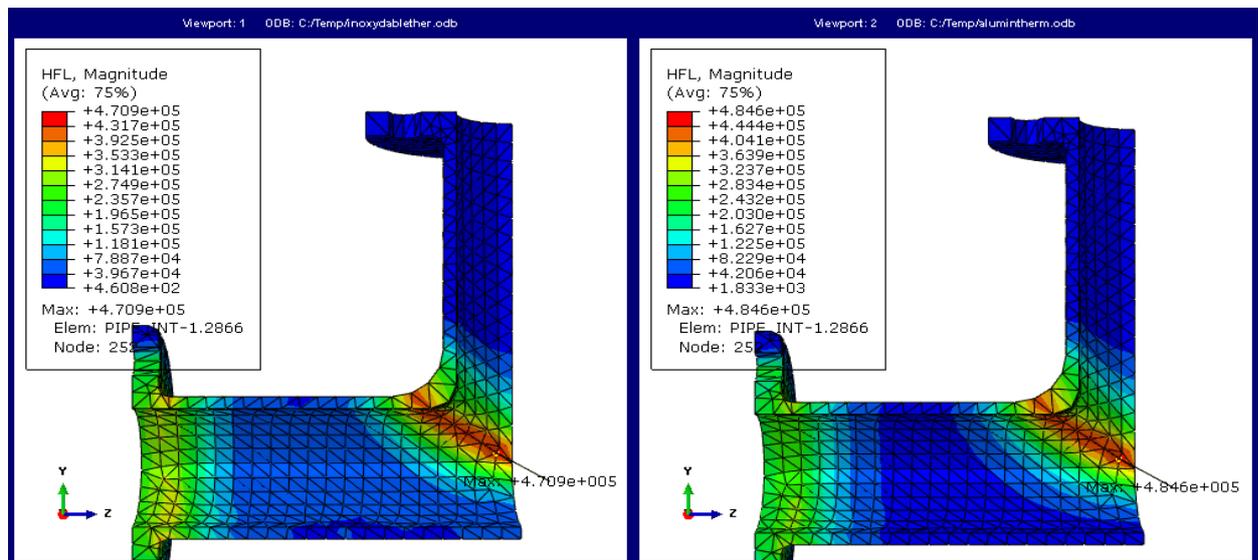


Figure III-13 contour de la température, a) jonction en 304L, b) jonction en Al

l'évolution de la température nodale dans les trois directions (x, y et z) en fonction de

la distance définit est représentée sur la figure III.14. La température commence avec une valeur de 200°C puis elle se stabilise à $T= 340^{\circ}\text{C}$ et s'approche de l'intersection où elle diminue progressivement jusqu'à $T=150^{\circ}\text{C}$ où on a déterminé déformation élastique maximale $\epsilon_{\text{max}}=0.07(\%)$ qui a une signification importante car c'est cette distance qui représente l'intersection entre les deux fluides et les deux tuyaux. Ensuite la température se stabilise à la valeur $T=11^{\circ}\text{C}$.

si on compare c'est résultats par rapport à celle déterminer pour une jonction en Aluminium, nous constatons que la résistance thermique et mécanique de l'acier inoxydable est plus importante par rapport l'aluminium.

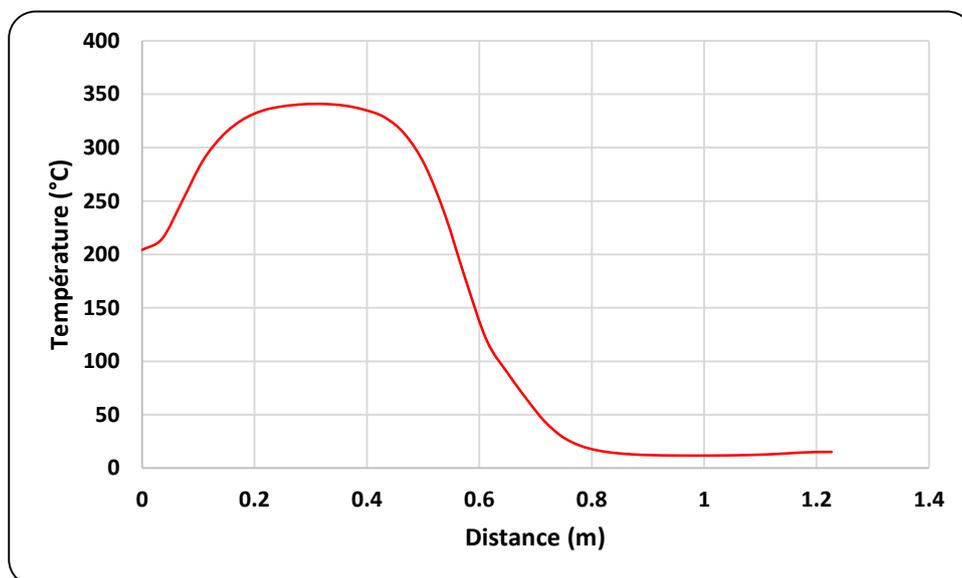


Figure III-14 Variation de la température en fonction de la distance

Conclusion générale

En conclusion de cette étude, nous pouvons affirmer que la modélisation thermomécanique des jonctions revêt un caractère sécuritaire avant tout. En effet, le comportement de la jonction dans des conditions de chargement (pression et température) caractérise la fiabilité et la sécurité des installations industrielles. Dans notre étude, les jonctions conçues avec deux matériaux ont été calculées, la concentration des contraintes est localisée à l'intersection. La jonction en acier inoxydable 304L se comporte favorablement par-rapport à celle en aluminium.

Les résultats présentés dans cette étude sont relatifs à la modélisation des jonctions sans soudures.

En perspectives, nous recommandons de :

- Considérer le comportement des cordons de soudure
- Tester d'autres types de jonctions
- Utiliser de nouveaux matériaux (matériaux composites)

Référence Bibliographie

- [01] : Yves JANNOT-livre *Transfert Thermique-2002*
- [02] : *les cours de transfert de chaleur-Mr Belhamiani Mohamed-2013*
- [03] : Roland fortunier- *Comportement Mécanique des Matériaux- (7)*
- [04] : Roland fortunier *Comportement Mécanique des Matériaux- (13-24)*
- [05] : *Catalogue technique sur les installations sous- marine de tube en polyéthylène- pipelife Norge AS- (38-41)*
- [06] : *Catalogue technique sur les installations sous- marine de tube en polyéthylène- pipelife Norge AS- (28-30)*
- [07] : *Catalogue technique sur les installations sous- marine de tube en polyéthylène- pipelife Norge AS- (36).*
- [08] : *Contraintes résiduelles due au soudage.*
- [09] : *Plan d'intervention suite a incident sur gazoducs Ø 16''- 20''et 28''- Sonelgaz transport du gaz-GRTG- Mars 2006 – (3-7).*
- [10] : *Rapport d'enquête sur un accident de pipeline (Rupture d'un gazoduc TransCanada PipeLines Limited)- Le Bureau de la sécurité des transports du Canada (BST) - Le 2 décembre 1997*
- [11] : *Stopaq Algerie-Vaincre De La Corrosion-Miramar Rais Amidou- ALGER-*
- [12] : *La Protection Cathodique*
- [13] : *Procédures relatives a la protection des ouvrages – generalites - sonelgaz transport du gaz- Journal officiel de la République Algérienne N°40 du 20 Juin 1999 (24-25-28-27-29).*
- [14] : *Principaux Procédés De Soudage-(2-6-8-9-10-12-17-20-22-23-35-38-40).*
- [15] : *Enquête SUMER 2003, Dares, www.travail.gouv.fr.*
- [16] : *Opérations de soudage à l'arc. Guide pratique de ventilation n° 7. Editions INRS ED 668. (INRS) (1996).*
- [17] : *Les fiches conseils : La soudure au gaz. La soudure à l'arc. www.mrbricolage.fr.*
- [18] : *ASM Handbook, Welding, Brazing and Soldering, Vol 6. ASM, 1299 pages, 1993*
- [19] : *Matériaux et Techniques, N°10-11-12, 67, 2003*
- [20] : *M. Hamada, S. Okaguchi, H. Shitamoto, Y. Komizo, Tensile Properties and Deformation Behavior at Welded Portion of X100 Line Pipe Steel, Proceedings of the international Pipe Dreamer's Conference, Yokohama, Japan, ed. M.Toyoda et R. Denys, 289-306, 2002*
- [21] : *R. BLONDEAU, « Métallurgie et mécanique du soudage », Mécanique et Ingénierie des matériaux, Lavoisier, 2001*

Référence Bibliographie

[22]: *Soudage à l'arc, C.E.R. ENSAM Angers-Laboratoire Industriel de Déformation Plastique ; www.angers.ensam.fr*

[23]: *Y. FURUKAWA, K. KANEYAMA, M. IKEBE, S. TAKASHINA, GMAW Processes for Girth Welded Joint of Gas Pipeline in Japan, Proceedings of the international Pipe Dreamer's Conference, Yokohama, Japan, ed. M.Toyoda et R. Denys, 725-738, 2002*

[24]: *S.K. DHUA, D. MUKERJEE, AND D.S. SARMA, Influence of Thermomechanical Treatments on the Microstructure and Mechanical Properties of HSLA-100 Steel Plates, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 34A, 241-253, 2003*

[25] *Soudage : définition, applications et généralités, Ouata au service de l'acier, www.otua.org.*

[26] : *Cdt MARCHI Frédéric SDIS 65-GRHZ.I. La Concorde-explosimètre.*

[27] : *La Convection Thermique. www.almohandiss.com*

[28] : *photos réel prendre dans une intervention réalisé par GRTG de Ain Temouchent- 2015*