



Université Joseph Fourier – Grenoble 1, UFR de Mécanique

Master Mécanique, Energétique et Ingénierie  
Spécialité Modélisation et Simulation en Mécanique

Année 2006-2007

# Modélisation numérique de l'étirage de tubes : Couplages thermomécaniques

**Olivier Guiraud**

Maître de stage: Muriel Palengat  
Tuteur UJF : Gregory Chagnon

# Remerciements

Je tiens à remercier M. Philippe Poncin, la société Minitubes et le laboratoire 3S-R pour m'avoir accueilli et confié cette étude.

J'adresse particulièrement mes remerciements à Muriel Palengat, Christophe Millet, Denis Favier et Gregory Chagnon pour leur présence et leur aide tout au long de ce stage.

Merci à Guillaume Robert, Christophe Odrat, Gildas Libert et Yoann Liabeuf pour leur disponibilité et leur savoir-faire sans qui les essais n'auraient pas été faits.

Merci à tous les co-bureaux, Luc, Pauline, Muriel, Guilherme pour leur bonne humeur et tous les autres sans qui ce stage n'aurait pas été le même.

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Cadre du stage</b>	<b>7</b>
2.1	Présentation du Pôle MC2MH du Laboratoire 3S-R (Sols, Solides et Structures - Risques) de Grenoble . . . . .	7
2.2	Présentation de la société Minitubes . . . . .	7
2.2.1	Historique . . . . .	7
2.2.2	Activité . . . . .	8
2.3	Procédé d'étirage de tube . . . . .	8
2.3.1	Étirage à creux . . . . .	9
2.3.2	Étirage sur substrat . . . . .	9
2.3.3	Étirage sur boulet flottant en carbure de tungstène . . . . .	10
2.3.4	Étirage sur olive en carbure de tungstène . . . . .	10
2.3.5	Étirage sur mandrin long en acier traité . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Expérimentation</b>	<b>12</b>
3.1	Dispositif expérimental . . . . .	12
3.2	Calibration du pyromètre . . . . .	14
3.2.1	Fonctionnement du pyromètre (Ranc, 2004) . . . . .	14
3.2.2	Objectif et méthode . . . . .	14
3.2.3	Résultats de la calibration du pyromètre . . . . .	15
3.3	Matériaux utilisés . . . . .	21
3.4	Résultats d'étirages . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Modélisation</b>	<b>24</b>
4.1	Introduction . . . . .	24
4.2	Travail bibliographique préalable . . . . .	26
4.2.1	Thermique . . . . .	26
4.2.2	Thermoélasticité . . . . .	28
4.2.3	Thermoplasticité . . . . .	29
4.2.4	Viscoplasticité . . . . .	32
4.2.5	Thermique au niveau du contact . . . . .	33
4.3	Lois de comportement des matériaux . . . . .	36
4.4	Modélisation thermique . . . . .	37
4.5	Modélisation numérique . . . . .	39
4.6	Résultats numériques . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Discussion</b>	<b>44</b>
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>47</b>

<b>Annexes</b>	<b>49</b>
<b>A Descriptif des expériences de calibration du pyromètre</b>	<b>49</b>
<b>B Descriptif des expériences réalisées à l'entreprise Minitubes</b>	<b>52</b>

## List of Figures

1	Un vaste choix de diamètres . . . . .	8
2	Grande variété de sections . . . . .	8
3	Micro assemblages tubulaires pour la chirurgie et l'endoscopie . . . . .	9
4	Étirage à creux . . . . .	9
5	Étirage sur substrat . . . . .	9
6	Étirage sur boulet flottant en carbure de tungstène . . . . .	10
7	Étirage sur olive en carbure de tungstène . . . . .	10
8	Étirage sur mandrin long en acier traité . . . . .	11
9	Banc d'étirage . . . . .	12
10	Représentation de l'étirage à creux . . . . .	13
11	Schéma d'un dispositif de mesure par pyrométrie . . . . .	15
12	Profil de température le long du tube - Image IR . . . . .	16
13	Évolution de la température au cours du temps ( $T_{cryo} = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) . . . . .	16
14	Évolution de la température au cours du temps ( $T_{cryo} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) . . . . .	16
15	Évolution de la température du tube lubrifié au cours du temps ( $T_{cryo} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) . . . . .	17
16	Évolution de la température mesurée (du tube) en fonction de l'émissivité entrée au pyromètre . . . . .	17
17	Évolution de la température mesurée (du tube) en fonction de l'émissivité entrée au pyromètre . . . . .	18
18	Évolution de l'émissivité du 316LVM en fonction de sa température . . . . .	18
19	Courbes expérimentales de calibration du pyromètre (Pour un tube en acier inoxydable 316LVM) . . . . .	19
20	Courbes de calibration du pyromètre interpolées (Pour un tube en acier inoxydable 316LVM) . . . . .	19
21	Courbes de calibration du pyromètre avec une émissivité de 15% (Pour un tube en acier inoxydable 316LVM) . . . . .	20
22	Essai de traction sur l'acier inoxydable (316LVM) (Palengat, 2006) . . . . .	21
23	Évolution de l'effort d'étirage au cours du temps - Test 1 . . . . .	23
24	Évolution de la température extérieure au cours du temps - Test 2 . . . . .	23
25	Évolution de la température extérieure au cours du temps - Test 3 . . . . .	24
26	Évolution de la température intérieure au cours du temps - Test 2 et 3 . . . . .	25

27	Comparaison des profils de température obtenus analytiquement et à l'aide du logiciel éléments finis . . . . .	27
28	Évolution temporelle de la température du système (Éléments finis) . . . . .	28
29	État en température du modèle Abaqus 3 D . . . . .	28
30	Conditions aux limites du modèle éléments finis . . . . .	32
31	Loi d'écrouissage du matériau utilisé pour l'étude . . . . .	32
32	Évolution temporelle de la température . . . . .	33
33	Lois d'écrouissages du matériau utilisé pour l'étude . . . . .	34
34	Évolution de la température en fonction de la déformation viscoplastique . . . . .	34
35	Loi de comportement viscoplastique du modèle PL . . . . .	38
36	Loi de comportement viscoplastique du modèle J-C . . . . .	38
37	Caractérisation des pertes convectives et du coefficient d'échange $h$ . . . . .	39
38	Conditions aux limites appliquées aux modèles . . . . .	40
39	Maillage utilisé . . . . .	41
40	Évolution de l'effort d'étirage numérique au cours du temps - Test 1 . . . . .	42
41	Évolution de la température extérieure numérique du tube (en un point fixé) au cours du temps - Test 2 . . . . .	43
42	Évolution de la température extérieure numérique du tube (en un point fixé) au cours du temps - Test 3 . . . . .	43
43	Comparaison numérique/expérimentale des efforts d'étirages - Test 1 . . . . .	44
44	Comparaison numérique/expérimentale de la température extérieure du tube - Test 2 . . . . .	45
45	Comparaison numérique/expérimentale de la température extérieure du tube - Test 3 . . . . .	46
46	Cryostat Junbo II (précis à $\pm 0,1^{\circ}C$ ) utilisé pour le calibrage du pyromètre	49
47	Photo de l'expérience de calibrage du pyromètre . . . . .	50
48	Photo de l'expérience de calibrage du pyromètre avec l'abri anti-reflets en place .	50
49	Pointage laser du pyromètre . . . . .	51
50	Placement du pyromètre sur le banc d'étirage . . . . .	52
51	Système de lubrification . . . . .	53
52	Capteurs d'efforts . . . . .	53
53	Chariot d'étirage . . . . .	53

## List of Tables

1	Étirages à creux réalisés . . . . .	22
2	Dimensions filière . . . . .	22
3	Récapitulatif des résultats expérimentaux . . . . .	24
4	Coefficients caractérisant le matériau utilisé . . . . .	31
5	Valeurs des paramètres de configuration des modèles J-C et PL . . . . .	37

6	Propriétés thermiques des matériaux constituant le système étudié . . . . .	38
7	Résultats de l'analyse inverse . . . . .	41
8	Températures intérieure numériques - Test 2 . . . . .	42
9	Récapitulatif des comparaisons numériques/expérimentales des efforts d'étirages	45
10	Comparaison numérique/expérimentale des température intérieures . . . . .	46

# 1 Introduction

La société Minitubes SA est spécialiste du tube de précision et des composants tubulaires au service des applications les plus exigeantes. Le procédé de mise ne forme des tubes est l'étirage.

L'étirage de tube est un procédé dans lequel un tube est étiré à travers une filière conique convergente. Des tubes à parois minces sont fabriqués par ce procédé d'étirage, en réduisant progressivement les diamètres intérieurs et extérieurs en même temps que l'épaisseur. Dans la plupart des cas, les industriels développent empiriquement leurs productions, mais cette technique est très coûteuse en temps et en énergie. C'est pourquoi les méthodes numériques sont de plus en plus utilisées.

Cependant de nombreux paramètres sont inconnus et leur identification n'est pas toujours simple. C'est le cas du coefficient de frottement, dont le rôle dans le procédé d'étirage est important. De nombreuses études ont cherché à déterminer directement ce coefficient expérimentalement, c'est le cas de Lazzarato et al (1997). D'autres études, ont traitées le problème différemment. Elles utilisent l'analyse inverse dans le but de calculer les paramètres du modèle à partir des données expérimentales en température, en déplacements ou en efforts. C'est le cas de Karnezis et Farrugia (1998) qui détermine les paramètres de son modèle à partir de la température et des efforts mesurés.

Dans ce travail, une détermination du coefficient de frottement par une analyse inverse a été réalisée à partir des données thermiques enregistrées lors d'étirages. Cette approche nécessite une connaissance poussée de l'état thermomécanique du tube durant l'étirage.

Lors de la suite, une première partie sera consacrée au cadre du stage, présentation de la société Minitubes et du laboratoire 3S-R. Ensuite les expériences réalisées et leurs résultats seront exposés. Les modélisations conçues et leurs résultats seront présentés et enfin la dernière partie sera consacrée à la comparaison des résultats numériques et expérimentaux afin de pouvoir ou non valider l'étude.

## 2 Cadre du stage

### 2.1 Présentation du Pôle MC2MH du Laboratoire 3S-R (Sols, Solides et Structures - Risques) de Grenoble

L'équipe Mécanique et Couplages Multiphysiques en Milieux Hétérogènes est constituée actuellement de 3 enseignants-chercheurs, de 2 chercheurs CNRS, d'un Ingénieur d'étude à mi-temps. Actuellement, cette équipe encadre les travaux de thèse de 8 étudiants.

Thématiques : Les recherches menées dans le cadre de l'équipe "Mécanique et Couplages Multiphysiques en Milieux Hétérogènes" (MC2MH) concernent l'étude de phénomènes mécaniques et physiques en milieux complexes. Plus précisément, cette activité est centrée sur l'étude de la déformation et/ou des écoulements au sein de milieux poreux, enchevêtrés, ou multiphasés en lien avec les mécanismes physiques pertinents associés. Ainsi, une attention particulière est apportée à l'étude des couplages entre les phénomènes mécaniques et des phénomènes tels que le transport, la thermique ou les changements de phase.

L'objectif des travaux est le développement de modèles de comportement. Ces modèles théoriques sont obtenus soit par approche macroscopique, soit par passage micro-macro. Des travaux expérimentaux et numériques sont également réalisés dans le but d'analyser les phénomènes étudiés et de valider les modèles. Enfin, dans certains cas les modèles développés sont intégrés dans des codes de calculs commerciaux ou universitaires.

Dans ce contexte, les travaux réalisés au cours de ces quatre dernières années s'organisent en trois thématiques:

- Écoulement, transport et acoustique en milieux poreux.
- Déformation et propriétés physiques des milieux enchevêtrés.
- Déformation et couplages thermomécaniques dans les alliages à mémoire de forme.

### 2.2 Présentation de la société Minitubes

#### 2.2.1 Historique

Minitubes est une société familiale Grenobloise fondée par M. Szmukler en 1932 qui emploie aujourd'hui plus de 200 personnes. C'est une entreprise qui a varié son activité et développé sa production avec différents matériaux et des produits de formes variées. En 1948, la société prend le nom de Minitubes et acquiert une notoriété internationale en fournissant les plus grandes sociétés mondiales de l'électronique. En 1962, elle reçoit l'oscar de l'exportation. En 1980, la production s'est diversifiée mais il reste des premières années le goût de la grande



précision et la présence mondiale : la moitié de la production est exportée dans 30 pays.

### 2.2.2 Activité

Son activité consiste en la fabrication de tubes (compris entre 0,15 et 15mm de diamètres et pour une épaisseur de 12  $\mu m$  à 3 mm) et de composants tubulaires qui ont des applications dans de nombreux domaines pointus tels que le secteur médical (avec notamment des implants chirurgicaux), l'électronique, l'aéronautique et la micro-mécanique. Minitubes met en forme plus d'une centaine de matériaux : acier, nickel, cuivre, titane. En tenant compte de tous les alliages possibles avec un vaste choix de diamètres et une grande variété de sections (Figures 1 et 2).

Chacun de ces domaines requiert des exigences particulières importantes ; on peut citer par exemple la biocompatibilité des matériaux notamment le Nitinol (NiTi) dans le cas des implants et l'ensemble des travaux poursuivis depuis une dizaine d'année donne des résultats encourageants.



Figure 1: Un vaste choix de diamètres

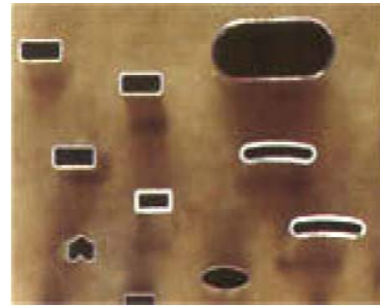


Figure 2: Grande variété de sections

Minitubes maîtrise de nombreuses techniques d'assemblage. Voici quelques exemples de produits témoins de ce savoir-faire (Figure 3):

### 2.3 Procédé d'étirage de tube

Pour obtenir un tube de dimension définie à partir d'une ébauche tubulaire, on fait se succéder un certain nombre d'opérations d'étirage. Une opération d'étirage diminue la section du tube en écrasant le matériau, il faut donc intercaler des opérations de recuit pour rendre au matériau sa capacité de déformation. Les étirages sont réalisés sur des tubes en couronne de plusieurs centaines de mètres ou en longueurs droites de quelques mètres chacune (6 mètres maximum).



Figure 3: Micro assemblages tubulaires pour la chirurgie et l'endoscopie

### 2.3.1 Étirage à creux

Ce procédé est utilisé si l'on veut diminuer le diamètre d'un tube sans modifier son épaisseur. Avec ce procédé (figure 4) on dégrade l'état de surface intérieur, il ne permet pas de calibrer la surépaisseur de soudure d'un tube réalisé à partir d'une ébauche roulée soudée mais il permet l'étirage en couronne.

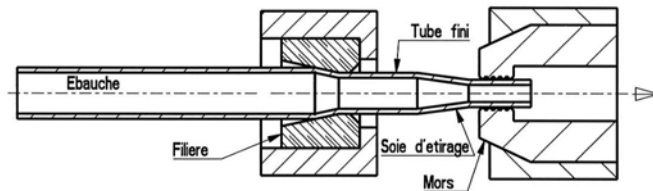


Figure 4: Étirage à creux

### 2.3.2 Étirage sur substrat

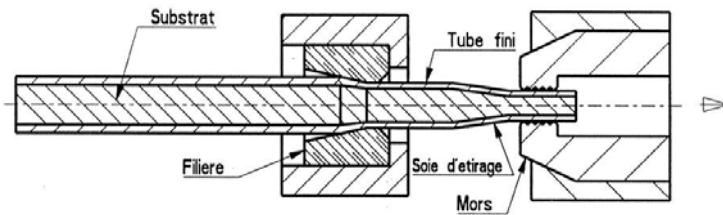


Figure 5: Étirage sur substrat

Le substrat (figure 5) est conservé tout au long de la fabrication, il doit donc se déformer lors de l'étirage et pouvoir être recuit dans les mêmes conditions que le tube étiré. Le substrat doit ensuite être enlevé, sans détériorer le tube, à la fin de la fabrication ; les couples matériaux étirés - substrat sont donc limités. Ce procédé est utilisé sur des tubes ne nécessitant pas une épaisseur constante, une bonne concentricité et un état de surface intérieur peu rugueux. Il permet l'étirage en couronne avec diminution d'épaisseur.

### 2.3.3 Étirage sur boulet flottant en carbure de tungstène

Le boulet (figure 6) est placé à l'intérieur du tube et est maintenu en équilibre grâce aux frottements. Il permet ainsi de réduire la section du tube. Ce procédé est le seul qui permet d'obtenir de très bons états de surface aussi bien extérieur qu'intérieur lors d'étirage en couronne, avec diminution d'épaisseur.

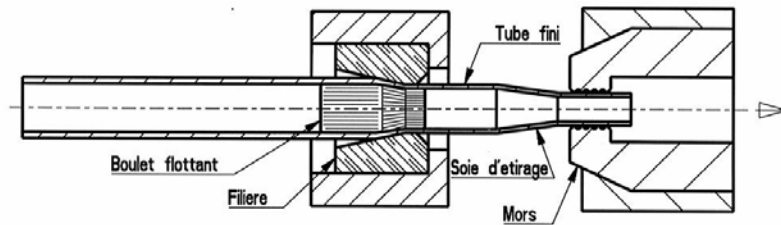


Figure 6: Étirage sur boulet flottant en carbure de tungstène

### 2.3.4 Étirage sur olive en carbure de tungstène

Il s'agit du même principe que l'étirage sur boulet sauf que l'olive (figure 7) est retenue par une tige. L'olive utilisée détermine avec précision le diamètre intérieur du tube final. Ce procédé permet l'étirage de tube à paroi mince en longueur droite.

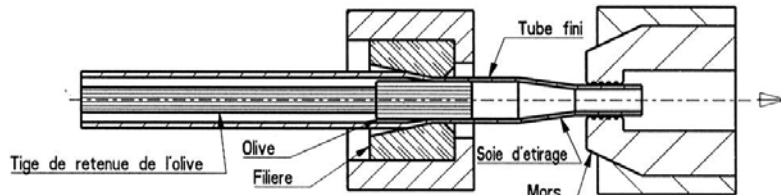


Figure 7: Étirage sur olive en carbure de tungstène

### 2.3.5 Étirage sur mandrin long en acier traité

Ce procédé (figure 8) est utilisé pour l'étirage de tube épais avec diminution de l'épaisseur en longueur droite, il permet d'importantes réductions de section lors de l'étirage. Le mandrin avance avec le tube. La partie la plus délicate de ce procédé est l'opération qui consiste à enlever le mandrin après l'étirage, sans détériorer le tube aussi bien au niveau aspect que dimensionnel.

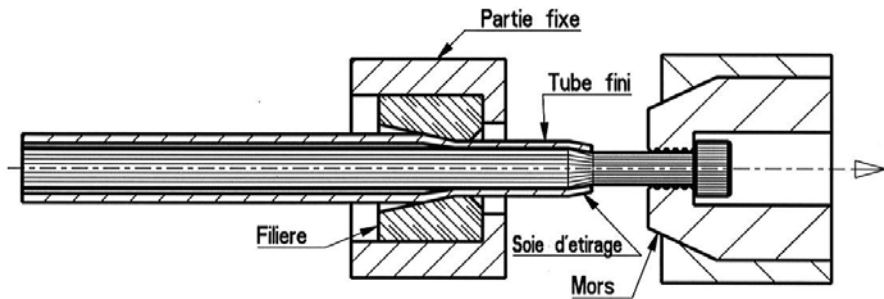


Figure 8: Étirage sur mandrin long en acier traité

Dans la suite de ce travail, seul l'étirage à creux sera étudié. En effet l'étirage à creux est plus simple à modéliser et propose de plus deux phénomènes thermiques différents. La surface intérieure n'étant pas soumise aux frottements.



Figure 9: Banc d'étirage

### 3 Expérimentation

Le but de ces expériences est de connaître les états thermiques et mécaniques des tubes durant leur étirage.

#### 3.1 Dispositif expérimental

Les expériences ont été réalisées sur des bancs d'étirage de la société Minitubes (Figure 9), c'est à dire dans les conditions de l'étirage industriel. La figure 9 montre un des bancs d'étirage de la société avec le support de la filière au centre, le guide du tube et l'outillage (ici électrique) nécessaire à l'étirage de tube. Le procédé testé expérimentalement ici est l'étirage à creux et à froid d'un tube en acier inoxydable (316LVM) lubrifié.

L'étirage à creux consiste à étirer un tube à travers une filière comme le montre la figure 10. Afin de pouvoir faire passer l'extrémité du tube dans la filière et que les mors du chariot d'étirage le maintienne, une extrémité de ce tube est martelée dans le but de réduire son diamètre extérieur. Le martelage est effectué de façon à ne pas trop fragiliser le tube, ce dernier ne devant pas casser lorsqu'il est étiré. Ensuite, les capteurs nécessaires sont installés sur le banc, la vitesse d'étirage est réglée et le tube peut être étiré. L'étirage à creux est utilisé industriellement afin de diminuer le diamètre extérieur d'un tube sans modifier son épaisseur. Avec ce procédé, l'état de surface intérieur est tout de même fortement dégradé.

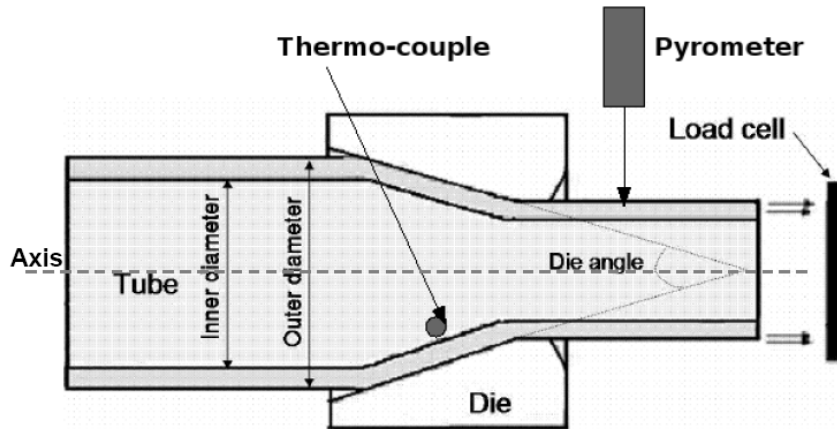


Figure 10: Représentation de l'étirage à creux

Lors de ces expériences, afin d'obtenir des données les plus complètes possibles, différentes vitesses d'étirage ont été appliquées.

L'acquisition des données nécessaires a été réalisée à l'aide de plusieurs types de capteurs: Les premiers sont des capteurs d'effort placés sur le support de la filière afin d'acquérir l'effort d'étirage durant l'essai. Trois capteurs ont été placés avec un angle de  $120^\circ$  pour vérifier que l'étirage effectué est bien dans l'axe. Enfin, leurs données ont été sommées pour obtenir l'effort d'étirage total. Ensuite, un capteur de vitesse a été placé sur le chariot d'étirage afin d'enregistrer la vitesse d'étirage durant l'essai. Enfin, deux capteurs thermiques ont été montés sur le système. Un thermocouple a été fixé à l'intérieur du tube afin d'obtenir l'évolution de sa température intérieure lorsque ce dernier est étiré et un pyromètre a été utilisé pour enregistrer l'évolution de la température extérieure du tube durant le test. Le pyromètre enregistre une température ponctuelle du tube à une distance bien précise de la sortie de la filière. En effet, des pertes convectives ont lieu entre la sortie de la filière et le point de mesure du pyromètre.

Avant l'utilisation du pyromètre, une calibration de ce dernier a été réalisée dans le but de vérifier la validité des résultats des expériences. La calibration a été nécessaire du fait des surfaces non planes sur lesquelles s'effectuent les mesures. De plus, l'émissivité de l'acier inoxydable 316LVM constituant les tubes étirés n'est pas connue dans ce type de conditions et avec cet appareil de mesure. Cette calibration a donc permis de calculer l'évolution de l'émissivité de l'acier inoxydable en fonction de la température du matériau. Il faut régler l'émissivité du matériau dans le pyromètre afin d'obtenir la température réelle. dans la gamme des températures auxquelles est soumis un tube lors d'un étirage, l'émissivité avec laquelle le pyromètre a donc pu être configurée.

## 3.2 Calibration du pyromètre

### 3.2.1 Fonctionnement du pyromètre (Ranc, 2004)

Le pyromètre IP 140 est un pyromètre numérique spécialement conçu pour la mesure sans contact de température de métaux ou de céramiques. Le rayonnement infrarouge d'un point de l'objet est focalisé sur le détecteur par les optiques et est converti en signal électrique. Ce signal est alors linéarisé numériquement puis converti en sorties analogiques et numériques standards.

#### Loi de Planck:

La luminance  $L_\lambda^0$  d'un corps noir à la température  $T$  est donnée par la relation:

$$L_\lambda^0(\lambda, T) = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} \quad (1)$$

Avec  $k = 1,380662.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$  constante de Boltzmann,  $h = 6,626176.10^{-34} \text{ J.s}$  constante de Planck et  $c = 2,998.10^8 \text{ m.s}^{-1}$  la célérité de la lumière dans le vide.

Le rayonnement émis par la surface d'un matériau dépend de sa température et de la longueur d'onde (Loi de Planck, Équation 1) et il est proportionnel au facteur d'émission caractéristique de la surface émettrice. La dépendance du rayonnement vis-à-vis de la température a permis le développement de la pyrométrie. En effet, l'utilisation d'un capteur couplé à un système optique, mesurant le rayonnement émis par la surface permet de déterminer la température de celle-ci. Contrairement aux capteurs intrusifs tels que les thermocouples, cette technique a l'avantage d'être non intrusive et d'avoir des temps de réponse très courts. Grâce au développement des caméras thermiques, la pyrométrie permet actuellement d'obtenir des cartographies de température. Toutefois, le principal inconvénient de cette technique est lié à l'incertitude sur la connaissance du facteur d'émission. Il faut soit disposer d'une autre mesure indépendante soit trouver un moyen pour minimiser le facteur d'émission.

Un pyromètre est constitué d'un système optique, d'un détecteur et d'un système d'amplification et d'acquisition permettant d'enregistrer le signal délivré par le détecteur (Figure 11).

### 3.2.2 Objectif et méthode

Dans le but de réaliser des essais sur les bancs d'étirages de la société Minitubes et donc d'obtenir les données nécessaires à la configuration des modèles Abaqus, on se propose de réaliser dans un premier temps la calibration du pyromètre sur des tubes dans lesquels un fluide calorifugé circule (de l'eau ou de l'huile), c'est-à-dire connaître l'évolution de la température mesurée en fonction de la température réelle du matériau, ceci pour chaque émissivité entrée au pyromètre. Ces expériences sont réalisées sur des tubes d'environ 6 mm de diamètres extérieurs et à l'aide du Cryostat Junbo II (précis à  $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ , Figure 46 de l'annexe A). Le tube est relié au

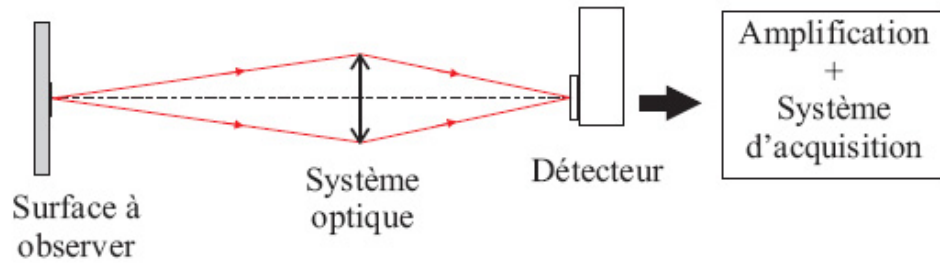


Figure 11: Schéma d'un dispositif de mesure par pyrométrie

cryostat à l'aide de flexibles et de raccords qui sont isolés pour limiter les pertes de chaleur par échanges convectifs avec le milieu extérieur (Figures 47 et 48 de l'annexe A). Le pyromètre a une plage de mesure de  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dans un premier temps le fluide utilisé est l'eau.

Le calibrage préalable du pyromètre a été réalisé sur un corps noir, le tube n'a pas été peint, afin de se rapprocher des conditions de mesures des bancs d'étirages de la société. Toutefois, dans le but d'éviter les reflets pouvant fausser les mesures, un abris a été créé autour du tube à l'aide de cartons.

En parallèle de ces mesures faites avec le pyromètre, des mesures réalisées avec une caméra infra rouge (Cedip JADE III) ont été faites. Ceci dans le but d'avoir une deuxième mesure fiable car éprouvée.

Des prises de vues ont donc été réalisées avec la caméra infrarouge (Figure 12). Ces images ont permis de vérifier que les pertes thermiques par échanges convectifs avec le milieu extérieur sont négligeables. En effet on peut voir sur la figure 12 que le profil de température le long du tube est sensiblement constant aux fluctuations près. De plus la température moyenne donnée par la caméra infrarouge à l'intérieur du rectangle bleu de la figure 12 est de  $79,58\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.3 Résultats de la calibration du pyromètre

#### Première série d'essais:

Pour ces premiers essais, seulement 2 températures générées par le Cryostat ont pu être réalisées. Le matériau du tube utilisé est le 316LVM qui est un acier inoxydable.

Les courbes des figures 13 et 14 sont réalisées à partir de tableaux de données extraits du logiciel InfraWin livré avec le pyromètre. Une des remarques pouvant être faite en observant ces figures est que lorsque la température augmente, les fluctuations de température sont plus faibles. Les mesures ont été réalisées sur des temps variables mais qui permettent toutefois d'obtenir assez de points de mesures et une moyenne représentative.



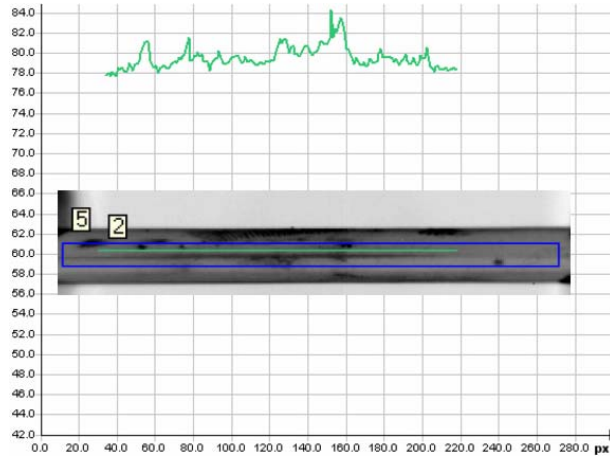


Figure 12: Profil de température le long du tube - Image IR

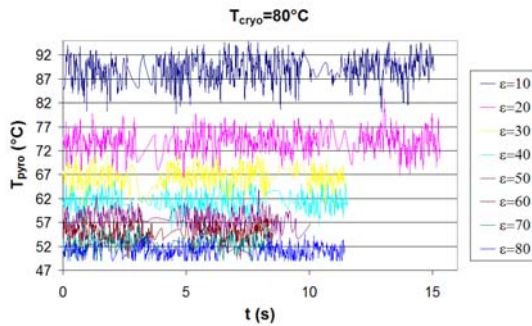


Figure 13: Évolution de la température au cours du temps ( $T_{cryo} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ )

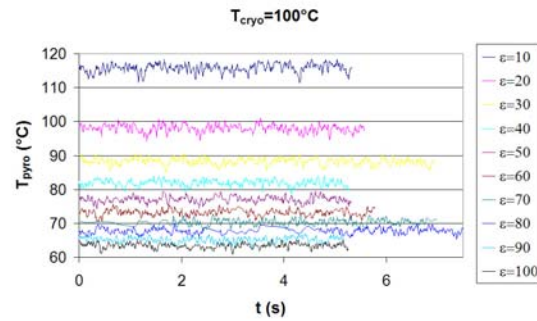


Figure 14: Évolution de la température au cours du temps ( $T_{cryo} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ )

De plus un essai a été réalisé en utilisant le même tube mais en y appliquant en surface le lubrifiant utilisé lors de l'étirage en usine. La variation de la température (pour différentes émissivités) dans le temps pour le tube lubrifié est représentée sur la figure 15.

On remarque dans un premier temps que la lubrification du tube engendre une augmentation de la température mesurée par le pyromètre, de plus elle atténue les fluctuations de température.

A partir des données des figures 13, 14 et 15, et en moyennant la température pour chaque émissivité, l'évolution de la température en fonction de l'émissivité rentrée au pyromètre peut être tracée (Figure 16).

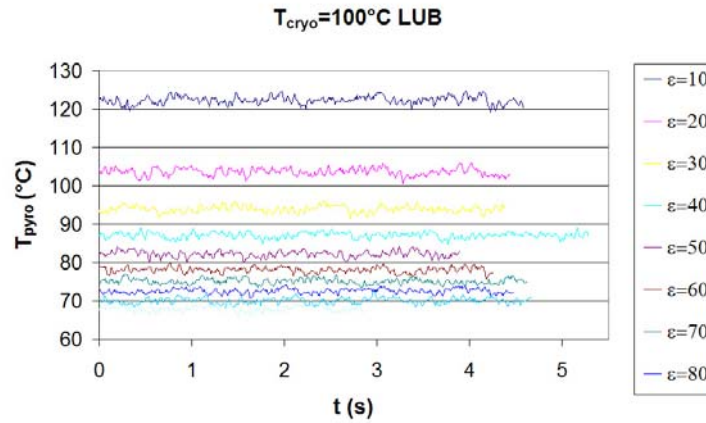


Figure 15: Évolution de la température du tube lubrifié au cours du temps ( $T_{cryo} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

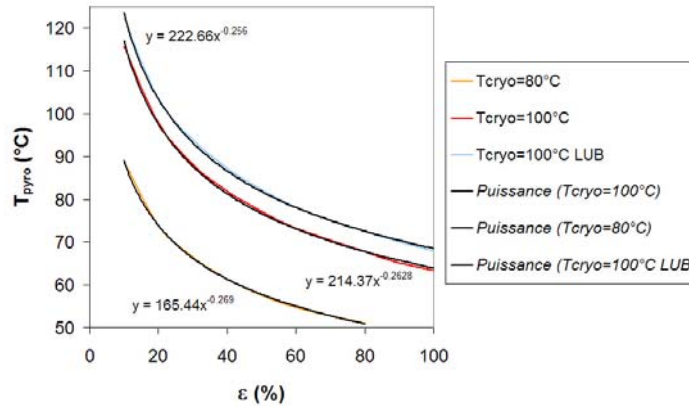


Figure 16: Évolution de la température mesurée (du tube) en fonction de l'émissivité entrée au pyromètre

On remarque une évolution similaire entre les différentes courbes. L'émissivité réelle du matériau évolue avec la température mesurée. De plus, la lubrification du tube entraîne une augmentation du facteur émissif que l'on doit entrer au pyromètre.

Ces courbes de calibrages permettent en effet un réglage de l'émissivité entrée au pyromètre lors de mesures en usine. Cependant du fait de la variation de l'émissivité avec la température il sera plus judicieux de recalibrer les données après mesures, celles ci sont prises avec une émissivité constante au cours de l'expérience.

On trouve à partir des courbes interpolées en lois puissances (Figure 16), pour l'acier inoxydable 316LVM: Une émissivité  $\epsilon = 14,9\%$  pour une température matériau de  $80^\circ C$ ,  $\epsilon = 18,2\%$  pour une température matériau de  $100^\circ C$  et  $\epsilon = 22,8\%$  pour une température matériau de  $100^\circ C$ , avec un tube lubrifié.

Pour conclure sur cette première série d'essais, les résultats obtenus ne permettent pas de calibrer le pyromètre de façon précise. L'objectif des futurs essais est donc de réaliser les mêmes mesures mais avec l'écart entre deux températures de mesures plus faible. Ceci permettra d'obtenir le calibrage complet du pyromètre.

### Deuxième série d'essais:

Les mêmes mesures que lors des premiers essais ont été réalisées. La figure 17 expose l'évolution de la température mesurée avec le pyromètre en fonction de l'émissivité entrée. On remarque que l'évolution obtenue est identique à celle obtenue lors de la première série d'essais. Pour les températures les plus basses, c'est à dire  $T = 60^\circ C$  et  $T = 70^\circ C$  les mesures ne sont pas très fiables du fait de la proximité avec la limite inférieure de la gamme de mesure du pyromètre.

De plus l'évolution de l'émissivité du matériau utilisé (316LVM) en fonction de sa température est décrite sur la figure 18. Cette courbe a été calculée à partir d'une interpolation des courbes de la figure 17.

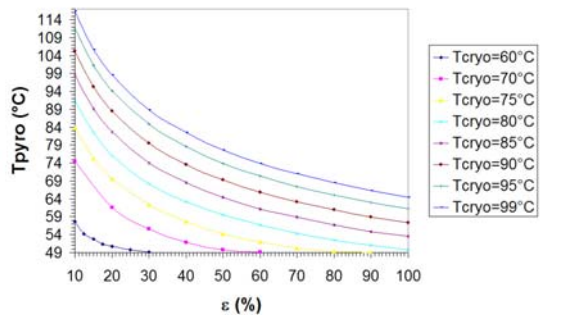


Figure 17: Évolution de la température mesurée (du tube) en fonction de l'émissivité entrée au pyromètre

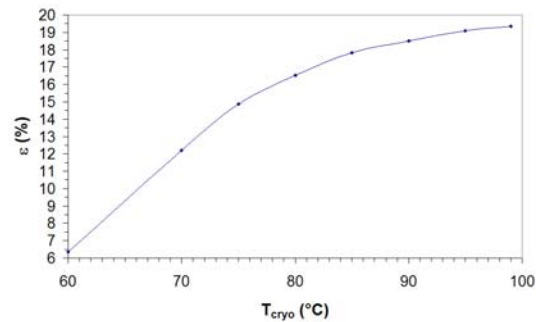


Figure 18: Évolution de l'émissivité du 316LVM en fonction de sa température

Enfin, à partir des données de l'expérience, l'évolution de la température mesurée ( $T_{pyro}$ ) en fonction de la température "réelle" du matériau ( $T_{cryo}$ ) a été calculée puis tracée pour chaque émissivité  $\epsilon$  (en %) entrée au pyromètre. (Figure 19). On remarque que l'évolution de la température mesurée en fonction de la température réelle du matériau est linéaire pour chaque

émissivité. Une extrapolation a donc pu être réalisée puis tracée sur une plage de température plus étendue (Figure 20).

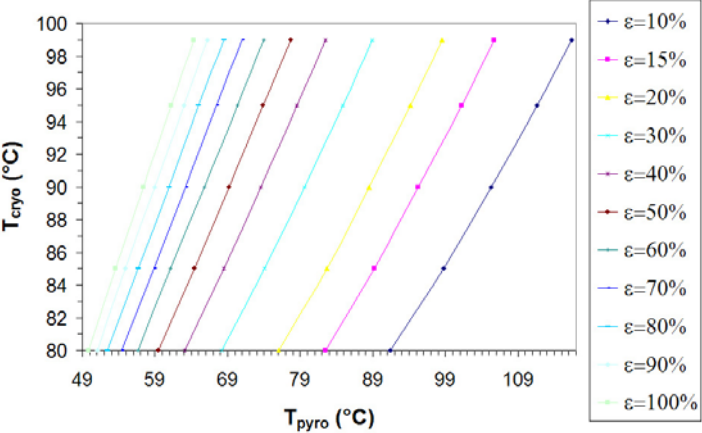


Figure 19: Courbes expérimentales de calibration du pyromètre (Pour un tube en acier inoxydable 316LVM)

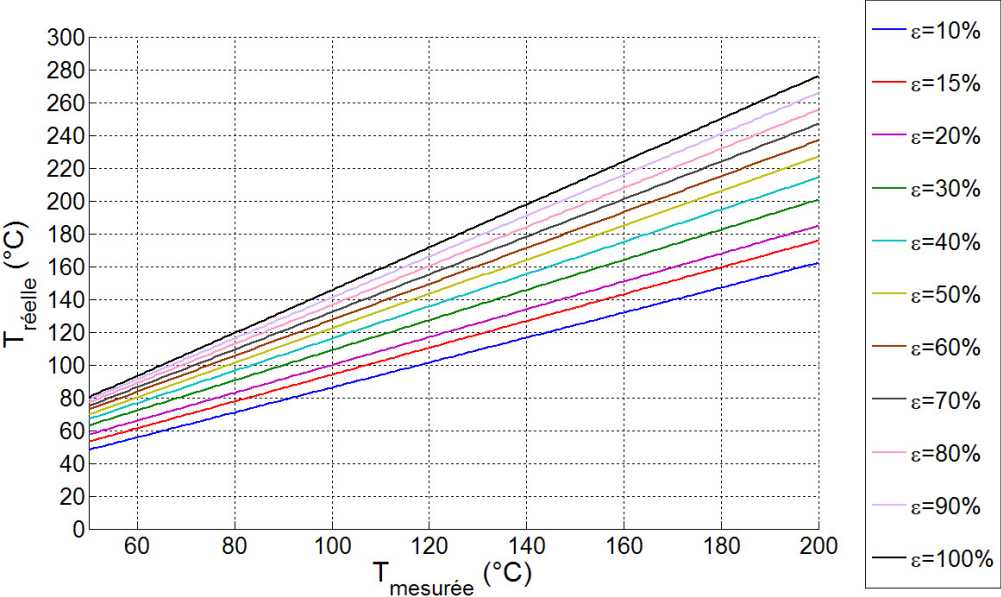


Figure 20: Courbes de calibration du pyromètre interpolées (Pour un tube en acier inoxydable 316LVM)

### Troisième série d'essais:

Dans le but de vérifier la validité des extrapolations linéaires réalisées sur la figure 20 une dernière série d'essais a été réalisée. Le fluide utilisé dans le Cryostat est une huile dont la température d'ébullition en milieu confiné approche les  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La température de  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  a été atteinte lors de ces essais. La figure 21 expose la température réelle du tube ( $T_{cryo}$ ) en fonction de la température mesurée à l'aide du pyromètre configuré avec une émissivité de  $15\%$  ( $T_{pyro}$ ). On peut remarquer sur cette figure que la courbe de calibration est linéaire et donc que les extrapolations réalisées sur les essais précédents sont validées.

Toutefois les valeurs mesurées pour les températures les plus basses ne se trouvent pas exactement sur la droite. Ceci confirme ce qui a été observé sur tous les essais, c'est à dire que le pyromètre est plus performant à haute température. De plus la courbe obtenue (figure 21) ne se superpose pas parfaitement à la courbe de la figure 20. Ceci est dû au fait que la surface de mesure durant ces essais était lubrifiée.

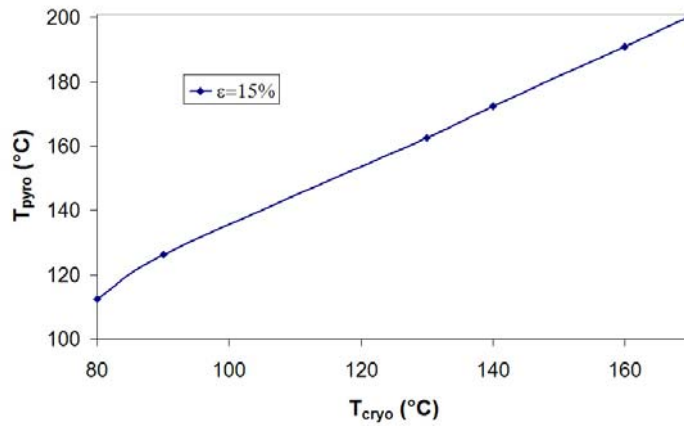


Figure 21: Courbes de calibration du pyromètre avec une émissivité de  $15\%$  (Pour un tube en acier inoxydable 316LVM)

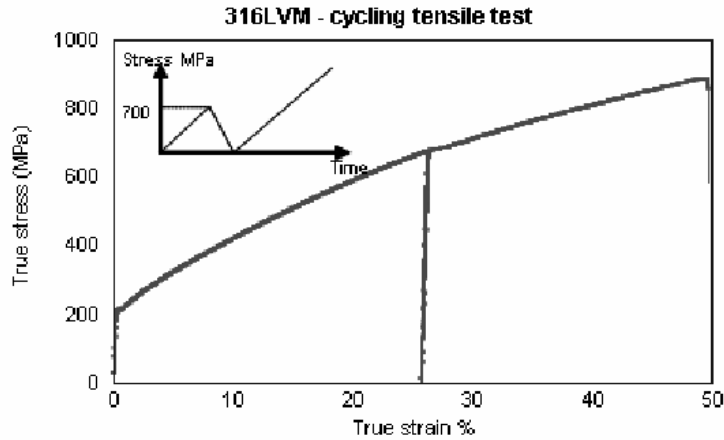


Figure 22: Essai de traction sur l'acier inoxydable (316LVM) (Palengat, 2006)

### 3.3 Matériaux utilisés

Le matériau constituant le tube est comme cela a été dit précédemment l'acier inoxydable 316LVM. De nombreuses données sont disponibles sur ce matériau, cependant il a été intéressant de réaliser des essais afin de déterminer son comportement plastique. Des essais de traction ont donc été réalisés par Palengat (2006). La figure 22 montre le comportement quasi statique obtenu pour un essai de traction à 50% réalisé à une vitesse de déformation de  $10^{-3} s^{-1}$ , le chemin de chargement étant exposé sur la figure. Des essais de cisaillement sont programmés afin de déterminer si l'écroutissage de ce matériau est isotrope ou cinématique. Dans un premier temps l'écroutissage du matériau sera considéré comme isotrope.

De plus, le module d'Young de l'acier inoxydable 316LVM est égal à  $E = 210000 MPa$  et son coefficient de Poisson est  $\nu = 0.3$ .

Le deuxième matériau présent dans le système est celui constituant la filière. C'est un carbure de tungstène (WC) dont les propriétés mécaniques et thermiques seront exposés dans le paragraphe dédié à la modélisation numérique.

### 3.4 Résultats d'étirages

Les essais réalisés sont présentés dans le tableau 1. Trois tests ont donc été faits, dans le but d'obtenir des données fiables en vue d'une étude numérique. En effet, deux vitesses d'étirage ont été appliquées. Les vitesses  $14.3 m.min^{-1}$  et  $3 m.min^{-1}$  correspondent respectivement à des vitesses de déformations de  $20 s^{-1}$  et  $86 s^{-1}$ . De plus deux diamètres de tubes ont été testés. La tableau 2 expose les dimensions de filières utilisées pour les deux dimensions de

Test	Matériau	Dimensions(mm)	Vitesse( $m.min^{-1}$ )
1	316LVM	$5.8 \times 6.6 \rightarrow 4.5 \times 5.2$	14.3
2	316LVM	$5.8 \times 6.6 \rightarrow 4.5 \times 5.2$	3
3	316LVM	$7 \times 8.2 \rightarrow 5.8 \times 6.6$	3

Table 1: Étirages à creux réalisés

Test	Diamètre(mm)	Portée (% du Diamètre)	Angle (°)
1 et 2	5.2	26	21
3	6.7	14	24

Table 2: Dimensions filière

tubes utilisées. Il est nécessaire de préciser que toutes les données expérimentales présentées ci-après sont reproductibles. En effet, plusieurs essais ont été réalisés pour chaque test donnant à chaque fois les résultats exposés dans cet article.

Premièrement, les données concernant les efforts d'étirages sont représentées sur la figure 23. Cette courbe montre que l'effort d'étirage est quasiment constant au cours de l'essai. Dans cette étude seul cet état qualifiable de stable sera étudié. Ni l'impact du tube sur la filière en début d'essai ni l'éjection du tube en fin d'essai ne seront étudiés. Il est intéressant de noter que lorsque la vitesse d'étirage augmente, l'effort d'étirage augmente aussi.

Ensuite, la température extérieure, dont l'acquisition a été réalisée à l'aide du pyromètre, a été étudiée. Les figures 24 et 25 exposent l'évolution temporelle de la température extérieure du tube mesurée ponctuellement après la filière (La distance point de mesure/filière est de 8 cm). La courbe exposée sur la figure 24 montre un état transitoire durant l'essai. Cet état est dû à la conduction au niveau du contact entre la filière et le tube. En effet, la filière monte en température au cours de l'essai.

En revanche la courbe de la figure 25 ne montre pas d'état transitoire. En effet les résultats présentés sur cette figure sont ceux du troisième tube étiré au cours du test 3. La filière était donc au moment de l'étirage déjà montée en température. Il est intéressant de noter que lorsque le diamètre du tube étiré augmente, la température extérieure de ce dernier augmente aussi.

Enfin, l'évolution de la température intérieure au cours des essais est présentée sur la figure 26. Ces températures ont été mesurées à l'aide d'un thermocouple fixé à l'intérieur des tubes étirés. Après un état transitoire, les courbes exposées se stabilisent aux alentours d'une température de 49 °C pour le test 2 et de 55 °C pour le test 3. Les parties transitoires des courbes sont peut-être dues à la convection à l'intérieur du tube ou au temps de réponse du matériel d'acquisition. Les températures intérieures des tubes durant les étirages retenues pour l'analyse numérique faite plus tard sont 49 °C et 55 °C.

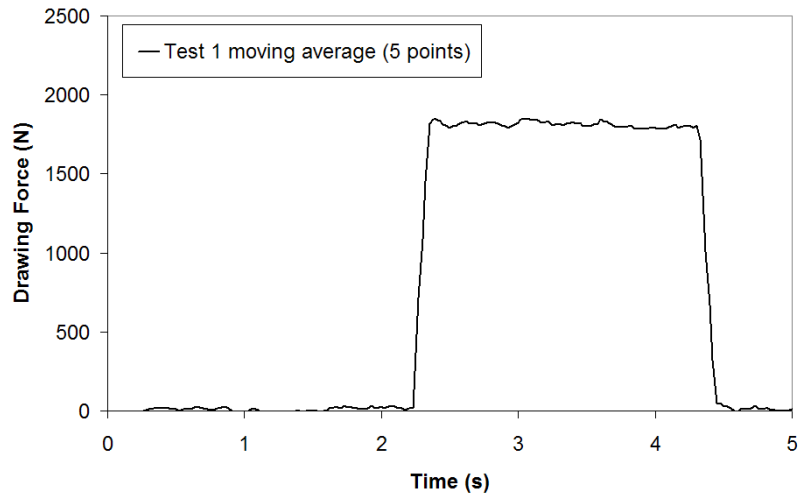


Figure 23: Évolution de l'effort d'étirage au cours du temps - Test 1

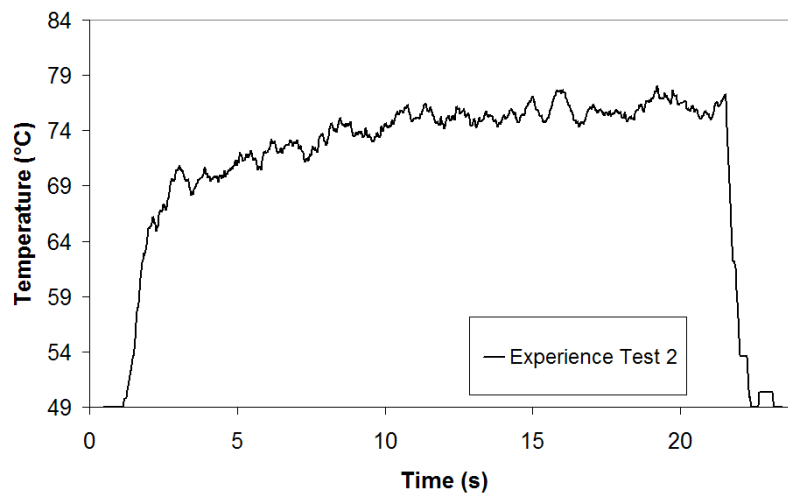


Figure 24: Évolution de la température extérieure au cours du temps - Test 2



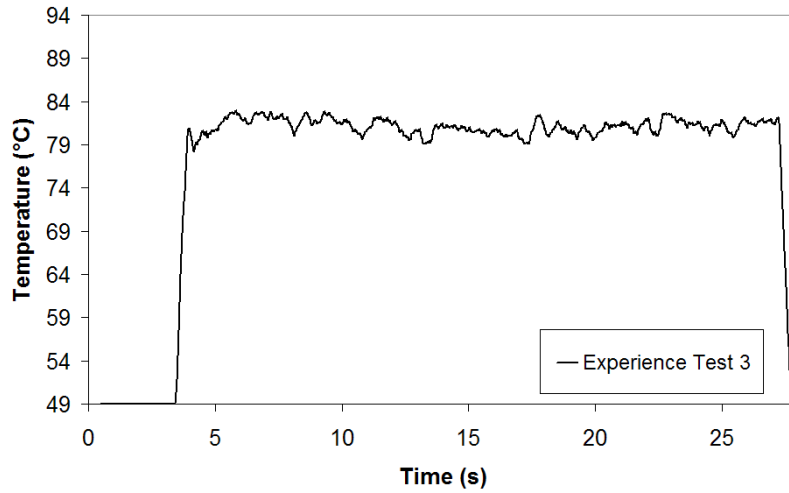


Figure 25: Évolution de la température extérieure au cours du temps - Test 3

**Vitesse d'étirage :  $3 \text{ m.min}^{-1}$**

---

(Test 2) Internal temperature :  $49 \text{ }^\circ\text{C}$

(Test 2) Drawing force : Essais Septembre 2007

(Test 3) Internal temperature :  $55 \text{ }^\circ\text{C}$

(Test 3) Drawing force : Essais Septembre 2007

**Vitesse d'étirage :  $14.3 \text{ m.min}^{-1}$**

---

(Test 1) Drawing force :  $1800 \text{ N}$

Table 3: Récapitulatif des résultats expérimentaux

Le tableau 3 récapitule les données expérimentales nécessaires à l'analyse numérique présentée dans la suite de ce travail.

## 4 Modélisation

### 4.1 Introduction

La démarche suivie dans cette étude est originale. En effet, le but est d'identifier des paramètres numériques à partir de données physiques, et cela dans une étude utilisant un couplage fort en température et en déplacement. Dans la plupart des travaux actuels les paramètres identifiés

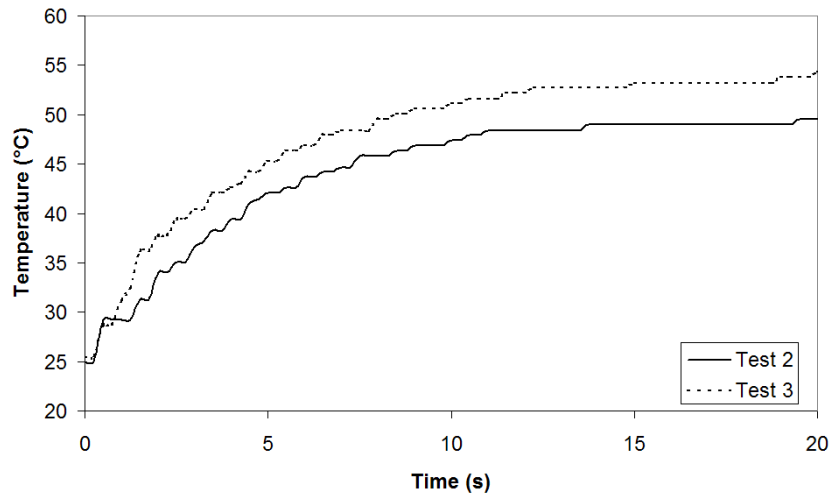


Figure 26: Évolution de la température intérieure au cours du temps - Test 2 et 3

dans cette étude sont déterminés directement à partir d'expériences conçues dans le but de cette détermination.

Dans la suite de ce travail, trois paramètres vont être identifiés par analyse inverse. Le premier est le coefficient de frottement qui est fortement lié aux efforts d'étirages mais aussi à la température extérieure du tube lorsque ce dernier est étiré. Ensuite, le second est la part d'énergie de plastification rendue au système sous forme de chaleur appelée dans le logiciel "In-elastic Heat Fraction" (IHF) qui est lié à la chaleur intérieure du tube. En effet, lors d'un étirage à creux, la production de chaleur à l'intérieur du tube est exclusivement liée à la plastification du matériau dans les premiers instants, ensuite la conduction dans le matériau peut aussi jouer un rôle. Enfin, le troisième est la conductivité de contact dont la température extérieure du tube en sortie de filière dépend.

## 4.2 Travail bibliographique préalable

### 4.2.1 Thermique

Les études thermiques sont réalisées à partir de l'équation de la chaleur, dont une des formes les plus communément rencontrées est décrite par l'équation 2.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - q - \operatorname{div} \left( \overline{\overline{\lambda}} \overrightarrow{\operatorname{grad} T} \right) = 0 \quad (2)$$

Avec:

- $q$ , une source de chaleur volumique qui est définie par la puissance thermique générée par unité de volume. Son unité est le  $W.m^{-3}$ .
- $\rho$ , la masse volumique du matériau dont l'unité est le  $kg.m^{-3}$ .
- $c_p$ , la capacité thermique massique du matériau. ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ).
- $\overline{\overline{\lambda}}$ , la matrice de conductivité thermique dont les termes sont exprimés en  $W.m^{-1}.K^{-1}$ .

Lorsque le matériau considéré est isotrope, la matrice de conductivité thermique en 3 dimensions peut s'écrire:

$$\overline{\overline{\lambda}} = \lambda \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \lambda = cte$$

Et l'équation de la chaleur 2 prend la forme suivante (Équation 3):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - q - \lambda \Delta T = 0 \quad (3)$$

On définit le vecteur densité de flux  $\vec{\varphi} = -\overline{\overline{\lambda}} \overrightarrow{\operatorname{grad} T}$  qui est caractérisé par les conditions aux limites (Flux sur la frontière) du système étudié. L'unité du vecteur densité de flux  $\vec{\varphi}$  est le  $W.m^{-2}$ . Plusieurs types de conditions aux limites sont rencontrés lors d'une étude thermique:

- **Échanges de chaleur par convection:** La loi de Newton définit un vecteur densité de flux dont l'expression est  $\vec{\varphi}_c = h(T_f - T)$ . Avec  $h$  un coefficient d'échange (caractéristique du matériau),  $T_f$  la température du fluide avec lequel le système échange de la chaleur et  $T$  la température du système sur sa frontière extérieure.
- **Échanges de chaleur par radiation:** La loi de Stephan-Boltzmann définit le vecteur densité de flux  $\vec{\varphi}_r = \epsilon \sigma (T_\infty^4 - T^4)$ . Avec  $\epsilon$  l'émissivité caractérisant le matériau du système,  $T_\infty$  la température du milieu extérieur,  $T$  la température du système et  $\sigma$  la constante de Stephan ( $\sigma = 5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ ).

- **Échanges de chaleur par conduction:** Ce type d'échanges de chaleur sera plus amplement étudié lors de l'étude thermique au niveau du contact.

Dans un premier temps, l'étude thermique caractérisée par l'équation 4 a été résolue à l'aide du logiciel Abaqus.

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (4)$$

La solution analytique de l'équation 4 est donnée par l'expression 5.

$$T(x, t) = T_L + \frac{4(T_0 - T_L)}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \sin\left(\frac{2n+1}{L}\pi x\right) \exp\left(-\frac{(2n+1)^2}{L^2}\pi^2 \frac{\lambda}{\rho c_p} t\right) \quad (5)$$

Le modèle Abaqus utilisé est un modèle en 2 dimensions de longueur 1 m et de largeur 1 m. Les caractéristiques matériau utilisées dans un premier temps sont  $\rho = c_p = \lambda = 1$ . L'étude Abaqus est transitoire avec un pas de temps  $\delta t = 0,1$  s. Le temps final utilisé est  $t_f = 1$  s et la température initiale du système est fixée à  $T_0 = 0$  °C. Les conditions aux limites sont de type Dirichlet et sont  $T_0 = T_L = 1$  °C.

Le résultat analytique comparé au résultat Abaqus est exposé sur la figure 27. Les barres d'erreurs présentes sur la figure 27 sont à 3 %. L'évolution temporelle de la température est donnée sur la figure 28.

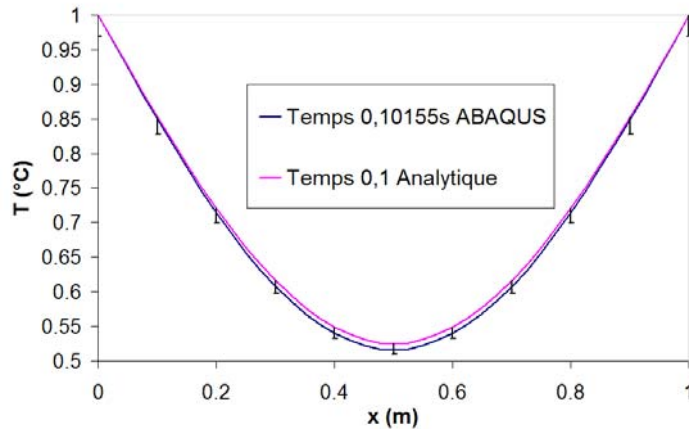


Figure 27: Comparaison des profils de température obtenus analytiquement et à l'aide du logiciel éléments finis

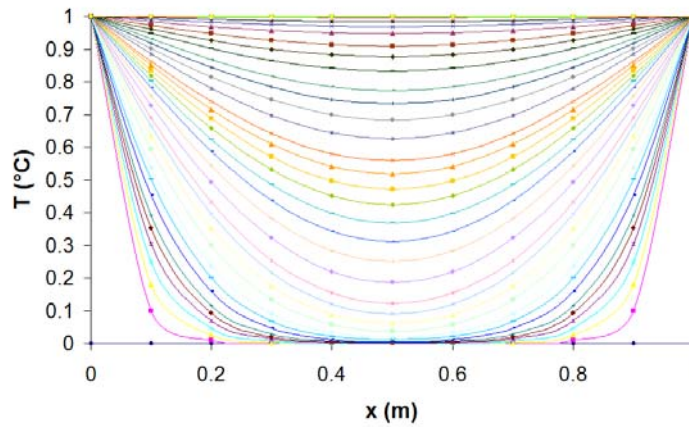


Figure 28: Évolution temporelle de la température du système (Éléments finis)

La figure 27 montre que les résultats Abaqus sont en accord avec les résultats analytiques. Les mêmes essais numériques ont été réalisés avec des caractéristiques matériau plus proche d'un matériau réel, l'accord trouvé entre la théorie et les résultats Abaqus reste excellent. De plus des essais sur un modèle 3 dimensions (Figure 29) ont été réalisés et les résultats obtenus sont identiques.

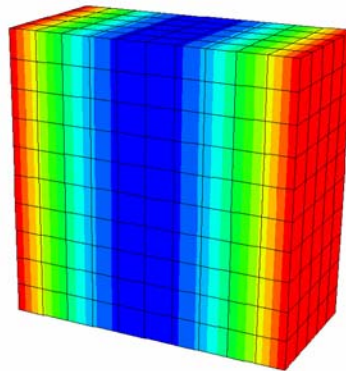


Figure 29: État en température du modèle Abaqus 3 D

#### 4.2.2 Thermoélasticité

Afin de résoudre un problème thermoélastique on définit la loi de Hooke thermoélastique de la façon suivante:  $\sigma = C : (\epsilon - \epsilon_{th})$ . Avec  $\epsilon_{th} = \bar{\alpha}(T - T_0)$  la dilatation thermique du matériau et

$C$  le tenseur de complaisance.

En thermoélasticité, l'énergie interne se décompose en 3 termes:

- L'énergie potentielle d'interaction associée a la puissance élastique volumique:  $P_{élastique} = \sigma \dot{\epsilon}_e$
- L'énergie d'agitation thermique associée a la puissance calorifique:  $P_{calorifique} = \rho c_p \dot{T}$
- Le couplage thermoélastique:  $P_{couplage\ élastique} = -T \frac{\partial \sigma}{\partial T} \dot{\epsilon}_e$

On peut donc écrire l'équation de la chaleur en thermoélasticité (Équation 6).

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = T \frac{\partial \sigma}{\partial T} \dot{\epsilon}_e + \lambda \Delta T \quad (6)$$

Pour un système adiabatique,  $\lambda \Delta T$  disparaît de l'équation de la chaleur (Équation 6), le lien entre la contrainte subie par le système et la température de ce dernier a été déterminé par Kelvin et s'écrit:

$$\delta T = -T_0 \frac{\alpha}{\rho c_p} \delta \sigma$$

Il existe deux méthodes pour résoudre un problème thermomécanique. La première consiste à faire un couplage faible, c'est à dire à calculer indépendamment le problème mécanique et le problème thermique, l'état thermique étant déterminé à partir de l'état mécanique du système. La seconde consiste à résoudre le problème thermique et le problème mécanique de l'étude en même temps (Couplage fort).

Le logiciel Abaqus permet de réaliser les deux types d'études, cependant pour les études thermoélastiques, seul le couplage faible peut être réalisé. En effet, l'effet Kelvin décrit précédemment n'est pas pris en compte par le logiciel car les effet engendrés par ce dernier sont négligeables (Aba, 2004).

### 4.2.3 Thermoplasticité

On exprime comme pour l'étude thermoélastique les différents termes permettant d'obtenir l'énergie interne:

- L'énergie potentielle d'interaction et les puissances plastique et élastique volumiques associées:  
 $P_{élastique} = \sigma \dot{\epsilon}_e$  et  $P_{écrouissage} = R \dot{\epsilon}_p$

- L'énergie d'agitation thermique et la puissance calorifique associée:  
 $P_{calorifique} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ . Avec  $c_p$  la capacité thermique massique à déformation et écoulement constants.
- Le couplage thermoélastique:  $P_{couplage\ élastique} = -T \frac{\partial \sigma}{\partial T} \dot{\epsilon}_e$
- Le couplage thermoplastique:  $P_{couplage\ plastique} = -T \frac{\partial R}{\partial T} \dot{\epsilon}_p$

L'équation de la chaleur prend alors la forme suivante:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \sigma \dot{\epsilon}_e - R \dot{\epsilon}_p + T \frac{\partial \sigma}{\partial T} \dot{\epsilon}_e + T \frac{\partial R}{\partial T} \dot{\epsilon}_p + \lambda \Delta T$$

On définit ensuite le coefficient de Taylor-Quiney comme étant le pourcentage d'énergie mécanique transférée au système sous forme d'énergie thermique. Ce coefficient est  $\beta$ :

$$\beta = \frac{\sigma \dot{\epsilon}_e - R \dot{\epsilon}_p + T \frac{\partial \sigma}{\partial T} \dot{\epsilon}_e + T \frac{\partial R}{\partial T} \dot{\epsilon}_p}{\sigma \dot{\epsilon}_p}$$

On trouve généralement dans la littérature ce coefficient compris entre 0,8 et 1. L'équation de la chaleur peut donc s'écrire sous la forme:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \beta \sigma \dot{\epsilon}_p + \lambda \Delta T \quad (7)$$

Afin de valider le fonctionnement du logiciel Abaqus pour des études thermoplastiques, une étude de traction dynamique a été réalisée puis comparée avec les résultats de la littérature Ranc (2005).

La loi de comportement du matériau utilisé pour cette étude est donnée par l'équation 8:

$$\sigma = k \epsilon_p^n \dot{\epsilon}_p^m T^\nu \quad (8)$$

La vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}_p$  est supposée constante ( $\dot{\epsilon}_p^0 = cte$ ), La température à déformation nulle est  $T_0 = 20 \text{ } ^\circ C$ .

L'équation de la chaleur à résoudre est donc:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \beta \sigma \frac{\partial \epsilon_p}{\partial t}$$

En multipliant par  $dt$ , on obtient:

$$\begin{aligned} \rho c_p dT &= \beta \sigma d\epsilon_p \\ \rho c_p dT &= \beta k \epsilon_p^n (\dot{\epsilon}_p^0)^m T^\nu d\epsilon_p \end{aligned}$$

$$T^{-\nu} dT = \frac{\beta k}{\rho c_p} (\dot{\epsilon}_p^0)^m \epsilon_p^n d\epsilon_p$$

On intègre:

$$\int_{T_0}^T T^{-\nu} dT = \frac{\beta k}{\rho c_p} (\dot{\epsilon}_p^0)^m \int_0^{\epsilon_p} \epsilon_p^n d\epsilon_p$$

$$\left[ \frac{T^{-\nu}}{1-\nu} \right]_{T_0}^T = \frac{\beta k}{\rho c_p} (\dot{\epsilon}_p^0)^m \left[ \frac{\epsilon_p^{n+1}}{n+1} \right]_0^{\epsilon_p}$$

$$T^{1-\nu} - T_0^{1-\nu} = \frac{(1-\nu)\beta k}{(n+1)\rho c_p} (\dot{\epsilon}_p^0)^m \epsilon_p^{n+1}$$

Enfin:

$$T = \left[ T_0^{1-\nu} + \frac{(1-\nu)\beta k}{(n+1)\rho c_p} (\dot{\epsilon}_p^0)^m \epsilon_p^{n+1} \right]^{\frac{1}{1-\nu}} \quad (9)$$

La relation 9 permet donc d'obtenir analytiquement l'évolution de la température en fonction de la déformation plastique.

Afin de réaliser les calculs Abaqus dans le but de les comparer aux résultats analytiques, les données matériaux sont nécessaires, elles sont décrites dans le tableau 4. De plus des données complémentaires sont nécessaires au logiciel Abaqus: Le module d'Young  $E = 200 \text{ GPa}$  et le coefficient de Poisson  $\nu = 0,3$  du matériau ainsi que la conductivité thermique  $\lambda = 15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

k	3118 MPa
n	0,2
m	0,0133
$\nu$	-0,5
$c_p$	$500 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
$\rho$	$7800 \text{ kg.m}^{-3}$
$\beta$	0,8

Table 4: Coefficients caractérisant le matériau utilisé

Les conditions aux limites imposées à la structure utilisée pour réaliser les calculs Abaqus sont décrites sur la figure 30.

La loi de comportement plastique du matériau est donnée au logiciel Abaqus après avoir été calculé à l'aide du logiciel Matlab. Cette loi est décrite sur la figure 31.

La comparaison des résultats analytiques et numériques pour l'évolution de la température en



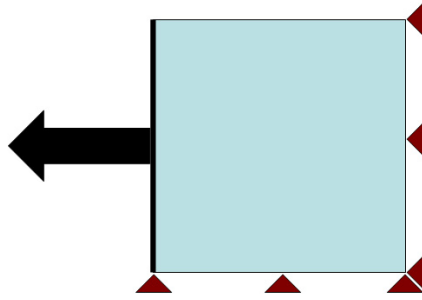


Figure 30: Conditions aux limites du modèle éléments finis

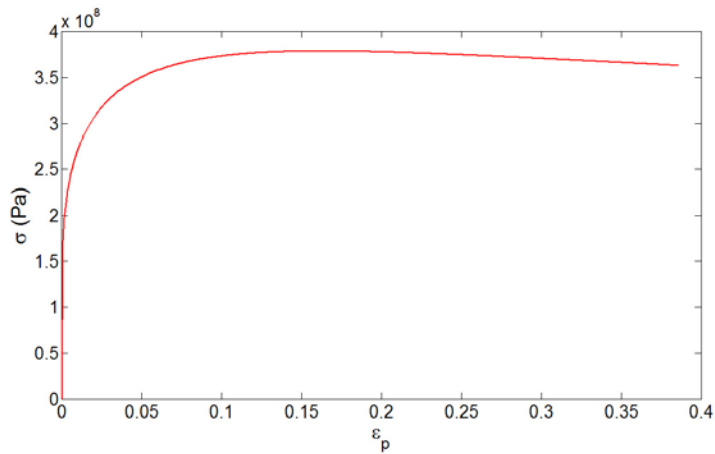


Figure 31: Loi d'écrouissage du matériau utilisé pour l'étude

fonction de la déformation plastique est donnée par la figure 32.

La figure 32 nous montre un accord excellent entre les résultats analytiques et les résultats Abaqus.

#### 4.2.4 Viscoplasticité

Afin de valider les résultats du logiciel Abaqus sur des études thermoviscoplastiques, le modèle décrit sur la figure 30 est utilisé.

Le logiciel Abaqus possède plusieurs modèles visqueux, celui utilisé lors de cette étude est défini par l'équation 10.

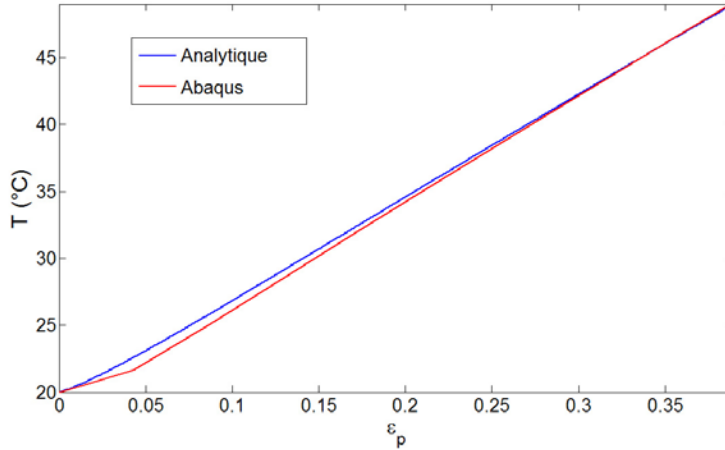


Figure 32: Évolution temporelle de la température

$$\dot{\epsilon}_p = D \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} - 1 \right)^n \quad (10)$$

Ce modèle est valable pour  $\sigma > \sigma_0$ . Une loi plastique statique (i-e que pour  $\dot{\epsilon}_p = 0$ ,  $\sigma_0(\epsilon_p)$  est définie) doit être donnée au logiciel avant de définir les paramètres  $D$  et  $n$ . Une loi est alors calculée pour chaque vitesse de déformations et le logiciel réalise une interpolation entre les différentes lois afin de calculer la contrainte équivalente correspondant à la déformation imposée.

Les caractéristiques de l'étude réalisée sont:  $D = n = t_{final} = 1$ ,  $\rho = 7800 \text{ kg.m}^{-3}$ ,  $c_p = 500 \text{ J.kg}^{-1}.K^{-1}$ ,  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\beta = 0.8$  et  $\delta t = 0,1$ .

La loi plastique statique, les lois de comportement obtenues analytiquement pour les vitesses de déformations  $\dot{\epsilon}_p = 0,32 \text{ s}^{-1}$  et  $\dot{\epsilon}_p = 0,149 \text{ s}^{-1}$  ainsi que les comportements respectifs résultants du logiciel Abaqus sont exposés sur la figure 33. La figure 34 expose la comparaison des résultats analytiques et numériques pour l'évolution de la température en fonction de la déformation plastique.

Les comparaisons des deux essais réalisés montrent une évolution similaire entre les résultats Abaqus et les résultats analytiques. les barres d'erreurs sur la figure 34 sont à 3% et mettent en évidence l'excellent accord existant entre les études.

#### 4.2.5 Thermique au niveau du contact

Afin de compléter cette étude, l'influence des transferts de chaleur au niveau du contact a été réalisée.

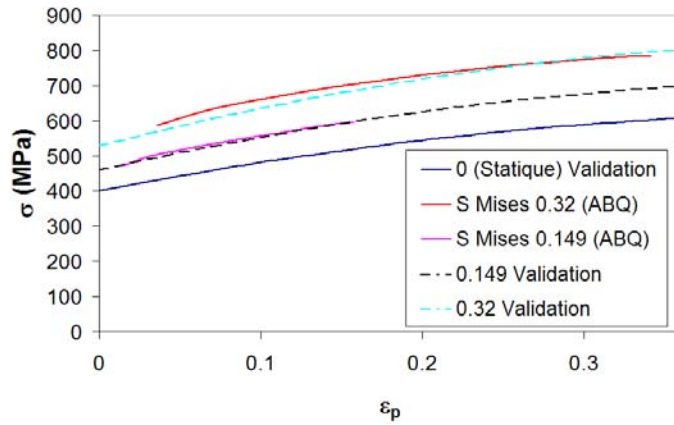


Figure 33: Lois d'écroissements du matériau utilisé pour l'étude

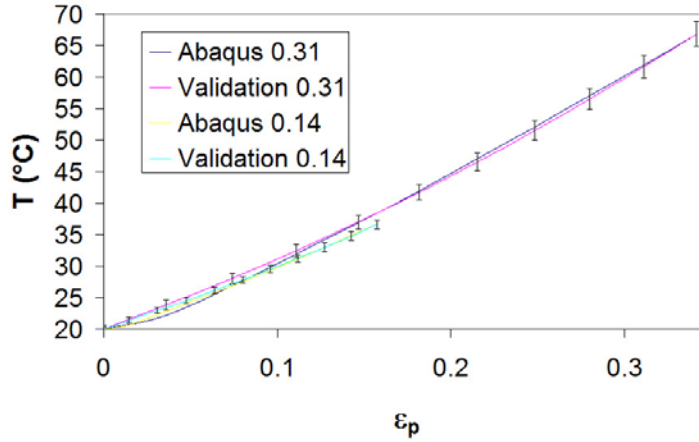


Figure 34: Évolution de la température en fonction de la déformation viscoplastique

Au niveau du contact, l'effort de friction est défini par:

$$\tau = \mu p$$

Avec  $\mu$  le coefficient de friction et  $p$  la pression de contact.

De même la puissance de friction est définie par:

$$P_{fr} = \tau \dot{\gamma}$$

Avec  $\dot{\gamma}$  la vitesse de glissement.

L'énergie mécanique du contact est donc connue, ensuite, la fraction  $\eta$  de cette énergie transmise au système sous forme de chaleur et le facteur de pondération  $f$  sont définis. Le facteur  $f$

permet en effet de définir la répartition de cette chaleur entre les surfaces maîtres et esclaves. Il vient donc la définition des flux de chaleurs relatifs aux surfaces en contact:

$$q_{esclave} = f\eta P_{fr}$$
$$q_{maitre} = (1 - f)\eta P_{fr}$$

L'énergie due aux efforts de friction étant décrite, il faut à présent définir l'échange de chaleur entre les surfaces en contact. Cet échange se traduit par un flux:

$$q = \lambda_c(\theta_{esclave} - \theta_{maitre})$$

La conductivité thermique de contact  $\lambda_c$  est donnée au logiciel Abaqus en fonction d'un paramètre nommé "clearance" qui définit en fait la distance entre les deux surfaces de contact. C'est ce paramètre qui a été utilisé pour les études menées. La conductivité de contact  $\lambda_c$  peut aussi être définie en fonction de la pression de contact  $p$ .

### 4.3 Lois de comportement des matériaux

Deux matériaux composent le système étudié dans cet article: d'une part l'acier inoxydable 316LVM dont l'essai de traction ayant permis d'obtenir le comportement a été présenté précédemment et d'autre part le carbure de tungstène, composant la filière. L'objet de ce paragraphe est de présenter la modélisation de leur comportement. Ces modélisations sont en effet nécessaires à la réalisation des simulations.

Les comportements élastiques de ces matériaux sont modélisés par un module d'Young et un coefficient de Poisson. Pour l'acier inoxydable 316LVM les valeurs de ces deux paramètres sont respectivement  $E = 210\,000\text{ MPa}$  et  $\nu = 0.3$ . Les valeurs de ces paramètres pour le carbure de tungstène ont été extraites de la littérature et sont respectivement  $E = 650\,000\text{ MPa}$  et  $\nu = 0.2$ . En effet, aucune déformation plastique n'a été observée sur une filière après étirage.

Ensuite un comportement viscoplastique a été défini pour l'acier inoxydable 316LVM. Des essais de cisaillement devraient être effectués rapidement dans le but de déterminer le comportement viscoplastique voire thermo-viscoplastique de ce matériau. Les essais n'ayant pas encore été effectués, deux modèles viscoplastiques extraits de la littérature (D. Umbrello (2006) et S. Frécharde (2002)) ont été utilisés pour simuler le comportement du matériau. Les comportements viscoplastiques modèles utilisés sont le modèle Power law (PL) qui est un modèle simple utilisé par le logiciel Abaqus et le modèle de Johnson-Cook (J-C) qui est un modèle couramment utilisé dans la littérature (D. Umbrello, 2006). Leur présentation est faite ci-après.

#### Modèle Power law:

$$\sigma_{eq} = \sigma_0(\epsilon^p) \left[ \left( \frac{\dot{\epsilon}^p}{D} \right)^n + 1 \right]$$

Où  $\sigma_0(\epsilon^p)$  est le comportement plastique quasi statique obtenu durant les essais de traction,  $\dot{\epsilon}^p$  est la vitesse de déformation qui s'exprime en  $s^{-1}$  et les coefficients  $D$  et  $n$  sont des paramètres matériau.

#### Modèle de Johnson-Cook:

$$\sigma_{eq} = \underbrace{(A + B\epsilon^{p^n})}_{\text{Terme d'écrouissage}} \underbrace{\left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0^p} \right) \right]}_{\text{Terme dynamique}} \underbrace{\left[ 1 - \left( \frac{T - T_a}{T_m - T_a} \right)^m \right]}_{\text{Terme d'adoucissement}}$$

Où  $\epsilon^p$  est la déformation plastique,  $\dot{\epsilon}^p$  est la vitesse de déformation s'exprimant en  $s^{-1}$ ,  $\dot{\epsilon}_0^p$  est la vitesse de déformation référence ( $s^{-1}$ ),  $T$  est la température du matériau déformé ( $^{\circ}C$ ),  $T_m$  est la température de fusion du matériau déformé ( $1399\text{ }^{\circ}C$ ) et  $T_a$  est la température ambiante ( $20\text{ }^{\circ}C$ ). Le coefficient  $A$  est une contrainte d'écoulement ( $MPa$ ),  $B$  est le module

<b>PL:</b>					
$D = 1000$	$n = 0.5$				
<b>J-C:</b>					
$A = 305$	$B = 1161$	$C = 0.01$	$n = 0.61$	$m = 0.517$	$\dot{\epsilon}_0^p = 1$

Table 5: Valeurs des paramètres de configuration des modèles J-C et PL

d'écrouissage ( $MPa$ ),  $C$  est le coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation,  $n$  est le coefficient d'écrouissage et  $m$  et le coefficient d'adoucissement thermique.

Plus généralement, le terme relatif à l'écrouissage correspond à la contrainte à vitesse de déformation constante  $\dot{\epsilon}_{eq}^p = \dot{\epsilon}_0^p$  et  $T = T_a$ . Le deuxième terme, caractérisant le durcissement dynamique, dépend de la vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}^p$ . Le troisième terme correspond au phénomène d'adoucissement thermique. Pour une température inférieure à  $T_a$ , ce terme est négligé.

Comme cela a été dit précédemment, les essais de traction réalisés ont permis d'obtenir le comportement quasi-statique du matériau. Ensuite les différents coefficients de configuration des deux modèles ont été adaptés avant de réaliser les simulations. Le tableau 5 expose les valeurs des coefficients choisis pour les deux lois viscoplastiques utilisées PL et J-C. Les coefficients de la loi de J-C utilisée sont issus de la littérature (D. Umbrello, 2006), ceux de la loi PL ont été adaptés afin de retrouver les comportements de la littérature (S. Fréchar, 2002) ou de la loi de J-C.

Les figures 35 et 36 montrent les comportements matériau entrés au logiciel pour les deux lois viscoplastiques utilisées, respectivement pour les lois de PL et J-C.

## 4.4 Modélisation thermique

Les propriétés thermiques des matériaux constitutifs du système sont présentées dans le tableau 6. Ces données, issues de la littérature, sont valables pour des températures comprises entre  $20^\circ C$  et  $100^\circ C$ . Il est possible de trouver une dépendance plus fine de ces différents paramètres à la température. Cependant l'écart en température observé expérimentalement n'est pas suffisant pour avoir une influence significative sur les valeurs de ces paramètres.

Dans le but d'améliorer les modèles numériques, des expériences de caractérisation des pertes thermiques convectives ont été menées. Ces expériences ont consisté à placer un tube à l'étuve pour que sa température soit homogène et à mesurer l'évolution de sa température extérieure lorsque celui ci est placé dans l'air ambiant. Le phénomène ainsi étudié est la convection naturelle. Plusieurs expériences ont été réalisées, les résultats sont présentés sur la figure 37.

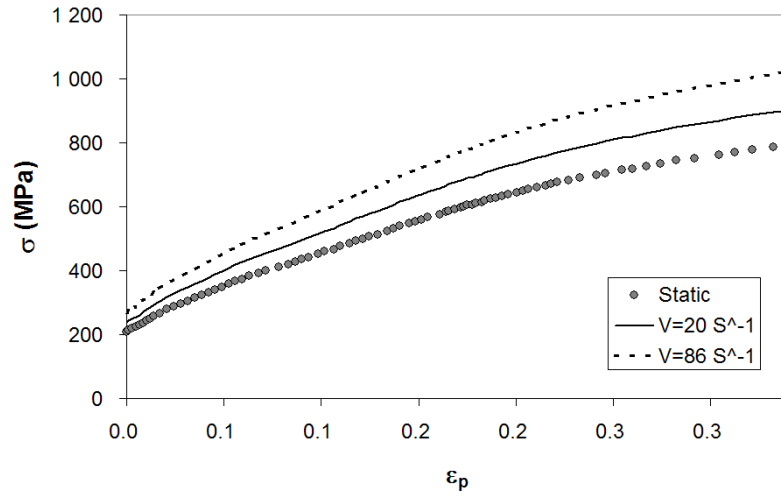


Figure 35: Loi de comportement viscoplastique du modèle PL

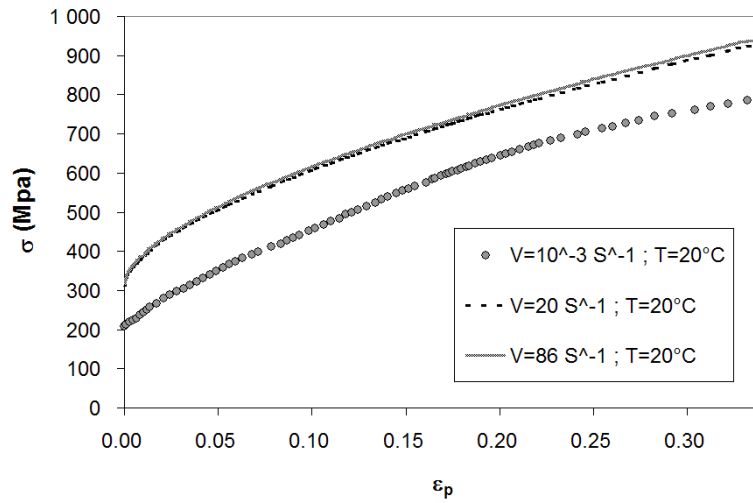


Figure 36: Loi de comportement viscoplastique du modèle J-C

	316LVM	WC
Thermal conductivity ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	15	62.7
Density ( $kg.m^{-3}$ )	$7.8 \cdot 10^3$	$13 \cdot 10^3$
Specific heat ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )	500	234

Table 6: Propriétés thermiques des matériaux constituant le système étudié

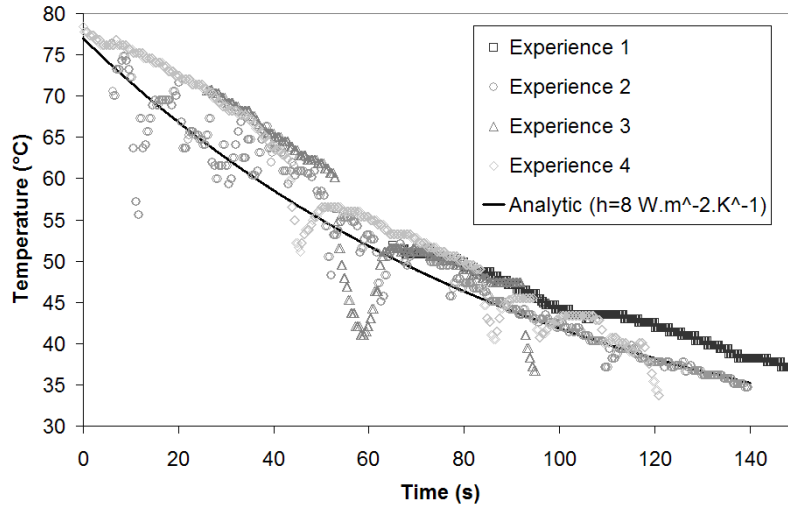


Figure 37: Caractérisation des pertes convectives et du coefficient d'échange  $h$

En parallèle, l'évolution de la température extérieure du tube au cours du temps est modélisé par l'équation de la chaleur suivante:

$$V\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - hS(T - T_a) = 0$$

Où  $V$  est le volume d'acier inoxydable,  $c_p$  est la chaleur spécifique de ce même acier,  $S$  est la surface d'échange,  $h$  est le coefficient d'échange (convectif),  $T$  est la température de la surface d'échange et  $T_a$  est la température ambiante.

Ensuite un schéma aux différences finies a été réalisé et le coefficient d'échange  $h$  a pu être calculé. Le coefficient d'échange calculé,  $h = 8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ , correspond bien aux données expérimentales, comme le montre la figure 37. Ce résultat correspond aux résultats donnés par la littérature qui situe dans ce cas le coefficient entre 5 et  $10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ .

## 4.5 Modélisation numérique

L'équation de la chaleur 11 est utilisée par le logiciel élément fini pour résoudre ce type de problème.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \beta \sigma \dot{\epsilon}_p + \lambda \Delta T \quad (11)$$

Où  $\beta$  est la part d'énergie de plastification rendue au système sous forme de chaleur,  $\rho$  est la densité,  $c_p$  est la chaleur spécifique et  $\lambda$  est la conductivité thermique.



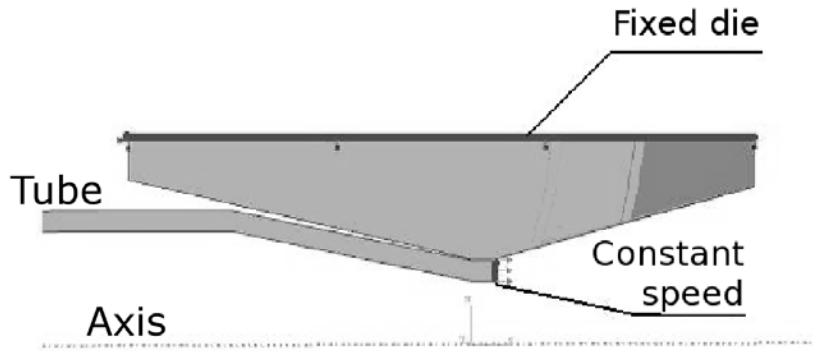


Figure 38: Conditions aux limites appliquées aux modèles

Le contact entre la filière et le tube est défini par un comportement tangentiel et un comportement normal. Le comportement tangentiel choisi est défini par un coefficient de frottement de type Coulomb. Les efforts normaux et tangentiels sont calculés par pénalisation. De plus, au niveau du contact, une conductivité thermique est défini. En effet, l'écart en température entre la filière et le tube font qu'en début d'étirage la température extérieure du tube est inférieure à celle en fin d'étirage comme on a pu le voir au cours des expériences. Cette conductivité de contact est un des paramètres qui fait l'objet de l'analyse inverse présentée ci-avant, car il détermine l'état transitoire visible sur les mesures de la température extérieure du tube.

Les conditions aux limites utilisées pour cette étude sont présentés sur la figure 38. Ces conditions sont les mêmes que celles observées expérimentalement. La filière est encastrée, le tube est étiré par son extrémité avec une vitesse constante égale à la vitesse moyenne mesurée expérimentalement. Ces vitesses sont égales à  $14.3 \text{ m.min}^{-1}$  pour le test 1 et  $3 \text{ m.min}^{-1}$  pour les autres. Les pertes thermiques par convection sont imposées sur les surfaces intérieure et extérieure du tube avec un coefficient d'échange  $h = 8 \text{ W.m}^{-2}.K^{-1}$  et une température ambiante de  $20^\circ C$ . Pour ce qui est des conditions initiales, le système complet a une température initiale fixée à  $20^\circ C$ .

Les éléments utilisés pour mailler le tube sont des éléments quadrilatères à 8 noeuds axisymétriques couplés thermiquement, quadratiques en déplacements et linéaires en température (CAX8T) (Aba, 2004). La filière est maillée avec des éléments CAX4T qui sont aussi des éléments axisymétriques couplés thermiquement, linéaires en déplacements et en température. Les éléments quadratiques sont utilisés pour mailler le tube car les éléments couplés en température et en déplacements ne se comportent pas très bien lorsqu'ils sont soumis à de la flexion. Le nombre de noeuds dans l'épaisseur du tube a donc de l'importance. Un des maillages utilisés au cours des différentes simulations est présenté sur la figure 39

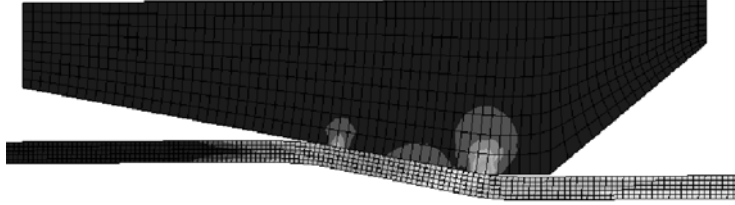


Figure 39: Maillage utilisé

Coefficient de frottement : 0.05
"Inelastic heat fraction" : 0.5
Conductivité de contact : $0.2 \text{ W.mm}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Table 7: Résultats de l'analyse inverse

## 4.6 Résultats numériques

Après calculs, le coefficient de frottement, la part d'énergie de plastification rendue au système sous forme de chaleur ainsi que la conductivité thermique de contact ont été adaptés pour se rapprocher au plus près des résultats expérimentaux. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 7. Les résultats en températures ou en efforts présentés dans la suite ont tous été obtenus avec ces valeurs.

Dans un premier temps les efforts d'étirage ont été étudiés, les résultats obtenus sont présentés sur la figure 40 où la force d'étirage obtenue pour les deux modèles viscoplastiques est représentée en fonction du temps. Les courbes présentées sur la figure 40 montrent un bon accord entre les deux modèles PL et J-C. En effet, un effort constant apparaît durant l'étirage. Il existe cependant un écart relatif inférieur à 5% entre les deux modèles. En complément, un modèle de J-C prenant en compte la dépendance de la loi de comportement à la température a été testé. Il apparaît que l'effort constant obtenu approche celui obtenu avec le modèle PL. Cet effort est égal à  $1785 \text{ N}$ . Le problème de ce modèle J-C avec prise en compte de la dépendance à la température est qu'il est très coûteux en temps de calcul et que son influence sur les résultats obtenus n'est pas significative. C'est pourquoi seuls les deux modèles présentés sur les figures 35 et 36 seront utilisés pour la suite. Pour des raisons de temps de calcul les simulations ont été limitées à environ 3 secondes d'étirage, un calcul durant environ une semaine.

Ensuite, l'évolution de la température extérieure du tube au cours de l'étirage numérique a été étudiée. Cette température a été prise à la même distance que la distance séparant le pyromètre de la filière expérimentalement, c'est à dire  $8 \text{ cm}$ . La figure 41 expose les résultats obtenus pour le test 2 et pour les deux modèles PL et J-C. Un état transitoire est visible sur les deux courbes, cet état ayant pour origine la montée en température de la filière au cours de

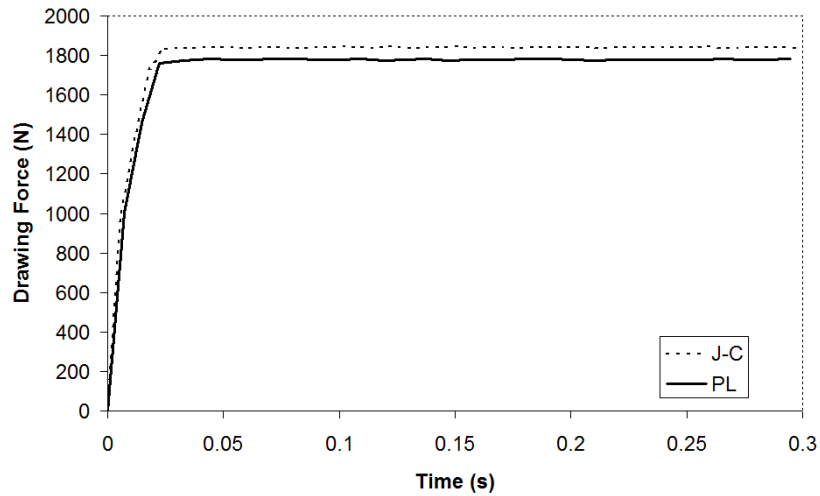


Figure 40: Évolution de l’effort d’étirage numérique au cours du temps - Test 1

---

(Test 2) Modèle J-C: 49 °C
(Test 2) Modèle PL: 50 °C
(Test 3) Modèle J-C: Simulation en cours
(Test 3) Modèle PL: 53 °C

---

Table 8: Températures intérieure numériques - Test 2

l’étirage. Il est intéressant de noter qu’il existe un bon accord entre les deux modèles PL et J-C.

De la même façon, la figure 42 expose l’évolution de la température extérieure au cours du temps pour le test 3. Le même comportement que pour le test 2 est en effet observable.

Finalement, les températures intérieures ont été calculées pour les différentes simulations réalisées. Les valeurs obtenues pour les différents tests sont présentées dans le tableau 8. Au cours des calculs, il est apparu que les pertes convectives n’avaient pas autant d’influence sur la température intérieure du tube que sur sa température extérieure, il est évident que cette remarque n’est valable que sur le temps d’étirage numérique. C’est pourquoi une unique température intérieure constante est conservée.

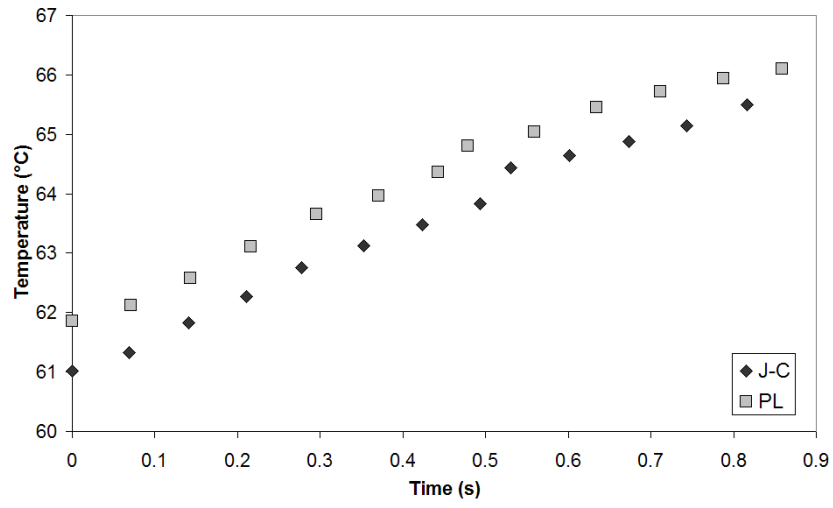


Figure 41: Évolution de la température extérieure numérique du tube (en un point fixé) au cours du temps - Test 2

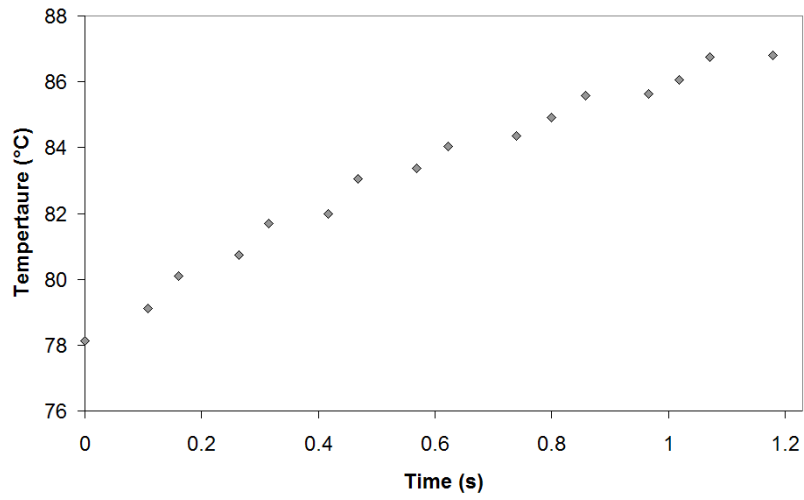


Figure 42: Évolution de la température extérieure numérique du tube (en un point fixé) au cours du temps - Test 3

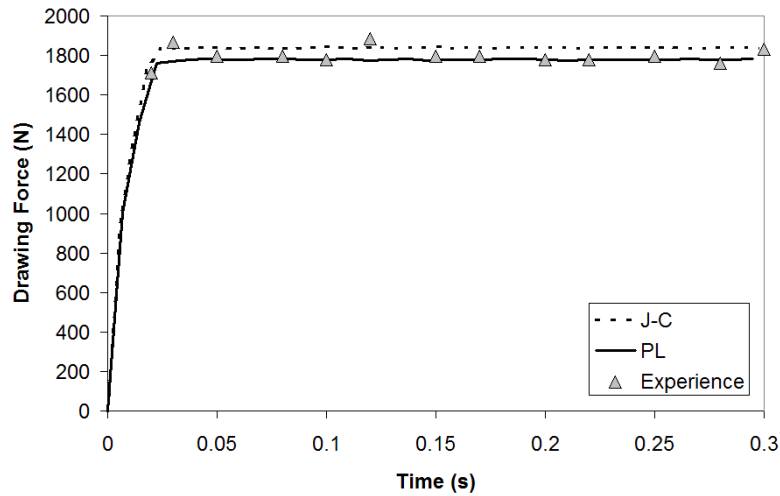


Figure 43: Comparaison numérique/expérimentale des efforts d'étirages - Test 1

## 5 Discussion

Cette section est consacrée à la comparaison des résultats expérimentaux et numériques. Les efforts d'étirages ont d'abord été comparés. La figure 43 montre les évolutions des efforts d'étirages numériques et expérimentaux dans le temps pour le test 1, c'est à dire à une vitesse d'étirage moyenne de  $14.3 \text{ m.min}^{-1}$ . L'accord entre les différentes données est excellent ce qui a permis de valider une partie du modèle testé. En effet, les efforts d'étirage sont en corrélation étroite avec le coefficient de frottement utilisé.

Le tableau 9 rassemble les données expérimentales et numériques obtenues au cours de cette étude. L'écart relatif maximal séparant les résultats expérimentaux et numériques est inférieur à 3%. Les résultats sont bons pour un même coefficient de frottement et pour des vitesses d'étirage différentes ainsi que des diamètres initiaux de tubes différents. Les résultats de cette analyse inverse faite sur les efforts d'étirage permet de confirmer la valeur du coefficient de frottement à  $\mu = 0.05$ .

Ensuite, les résultats numériques et expérimentaux concernant l'évolution de la température extérieure du tube dans le temps ont été comparés. La figure 44 montre que l'état transitoire observé expérimentalement a été retrouvé numériquement pour le test 2, avec les deux modèles PL et J-C. Cette analyse inverse permet en effet de valider la conductivité thermique de contact choisie: c'est à dire  $\lambda_c = 0.2 \text{ W.mm}^{-2}.K^{-1}$ .

De la même façon pour le test 3, la température extérieure calculée numériquement est

Test	Numerical	Experimental	Relative difference
1	1850 <i>N</i> (J-C)	1800 <i>N</i>	2.7 %
1	1780 <i>N</i> (PL)		1.2 %
2	Simulation en cours (J-C)	Essais Septembre 2007	
2	1650 <i>N</i> (PL)		%

Table 9: Récapitulatif des comparaisons numériques/expérimentales des efforts d'étirages

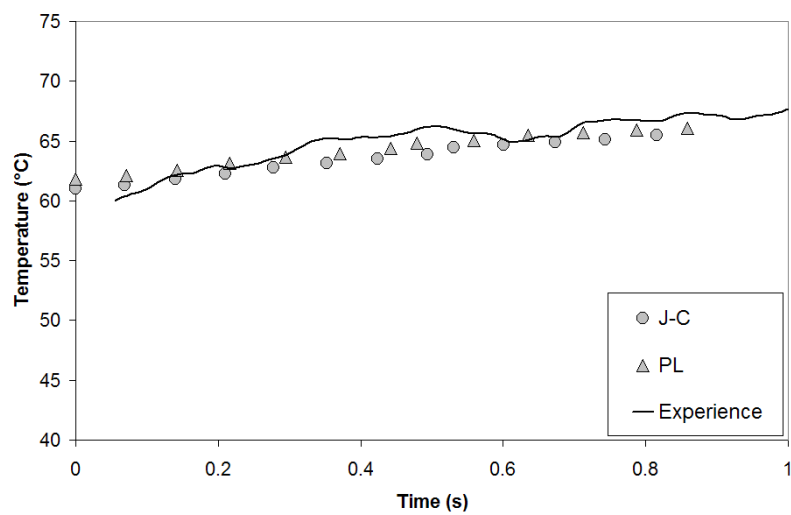


Figure 44: Comparaison numérique/expérimentale de la température extérieure du tube - Test 2

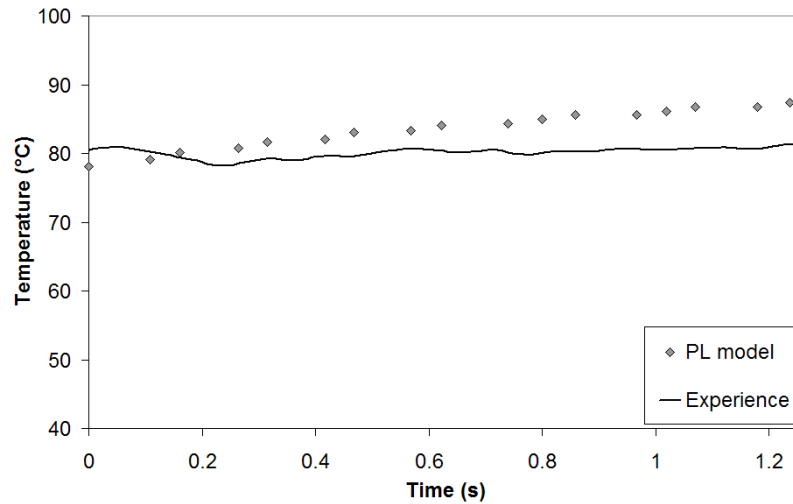


Figure 45: Comparaison numérique/expérimentale de la température extérieure du tube - Test 3

Numerical	Experimental	Relative difference
(Test 2) J-C model : 49 °C	49 °C	0.2 %
(Test 2) PL model : 50 °C		2 %
(Test 3) J-C model : Simulation en cours	55 °C	
(Test 3) PL model : 53 °C		3.6 %

Table 10: Comparaison numérique/expérimentale des température intérieures

en bon accord avec les données expérimentales comme la figure 45 le montre. Toutefois l'augmentation de la température extérieure numérique est supérieure à l'augmentation de la température extérieure expérimentale. Cela est dû au fait que la filière était déjà montée en température durant l'essai. En effet, les valeurs expérimentales présentées sont celles obtenues lors de l'étirage du troisième tube de la série.

Finalement, la dernière comparaison concerne la température intérieure du tube lorsqu'il est étiré. Le tableau 10 expose ces comparaisons. Ce tableau montre un bon accord (inférieur à 2%) entre les données numériques et expérimentales, ce qui permet de valider la part d'énergie de plastification rendue au système sous forme de chaleur choisie. Cette part a été choisie à  $\beta = 0.5$ .

## 6 Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence les possibilités offertes par les calculs éléments finis. En effet, cette approche originale a eu pour résultats la détermination du coefficient de frottement modèle de ce type d'étirage mais aussi de paramètres jouant un rôle important dans l'état final du tube après étirage. Les études habituellement trouvées sur ce sujet traitent souvent les problèmes thermomécaniques en découplant la thermique de la mécanique ou cherche directement les paramètres de configurations des modèles expérimentalement.

Deux modèles thermoviscoplastiques, J-C et PL dans le logiciel Abaqus ont permis de déterminer le coefficient de frottement ( $\mu = 0.05$ ), "l'Inelastic Heat Fraction" ( $\beta = 0.5$ ) et la conductivité thermique de contact ( $\lambda_c = 0.2 \text{ W.mm}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ).

Des expériences d'étirages ont permis d'obtenir des données mécaniques et thermiques au cours de la mise en forme.

Cependant, les lois viscoplastiques utilisées dans ce travail sont issues de la littérature. De futures expériences devront être réalisées dans le but d'obtenir le comportement viscoplastique de l'acier inoxydable 316LVM voire thermo viscoplastique de cet acier. En effet il apparaît que la dépendance à la température du comportement du matériau est assez forte.

Dans le cadre de mon stage, ce travail m'a permis d'étudier un sujet de façon relativement autonome car personne, dans le cadre de la thèse de Muriel Palengat ou au sein de l'entreprise Minitubes, n'avait encore travaillé sur les problèmes thermomécaniques appliqués à l'étirage de tube. Ce stage a donc été très enrichissant, sur le plan professionnel mais aussi sur le plan personnel.



## References

(2004). *Abaqus 6.5 Documentation*.

D. Umbrello, R. M'Saoubi, J. O. (2006). The influence of johnson-cook material constants on finite element simulation of machining of aisi 316l steel. *Machine tools and manufacture*.

Karnezis, P. et Farrugia, D. C. J. (1998). Study of cold tube drawingby finite-element modeling. *J. Mater. Process. Technol.*, **80-81**, 690–694.

Lazzarato, L. et al (1997). Identification of coulomb's friction coefficient in real contact conditions applied to a wire drawing processes. *Wear*, **221**, 54–63.

Palengat, M. (2006). *Simulation par éléments-finis de l'étirage de tubes*.

Ranc, N. (2004). *Étude des champs de température et de déformation dans les matériaux métalliques sollicités à grande vitesse de déformation*.

Ranc, N. (2005). *Couplage Thermomécanique*.

S. Fréchar, A. Redjaïmia, G. M. E. L. (2002). Comportement dynamique et évolution microstructurale d'un acier inoxydable austénitique allié à l'azote.

## Annexes

### A Descriptif des expériences de calibration du pyromètre



Figure 46: Cryostat Junbo II (précis à  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ) utilisé pour le calibrage du pyromètre

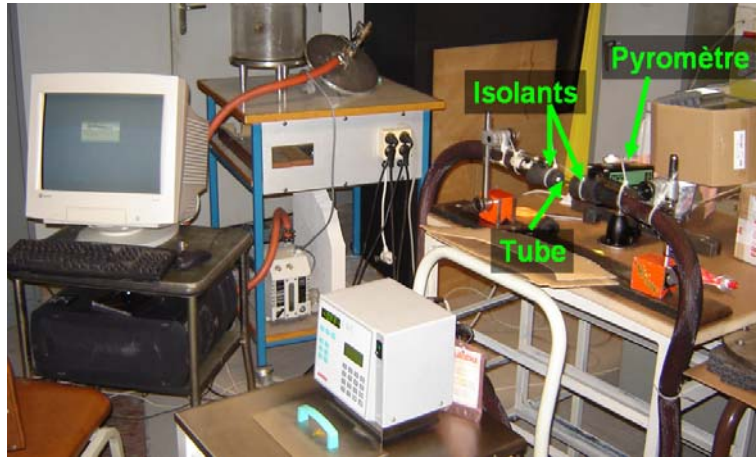


Figure 47: Photo de l'expérience de calibration du pyromètre

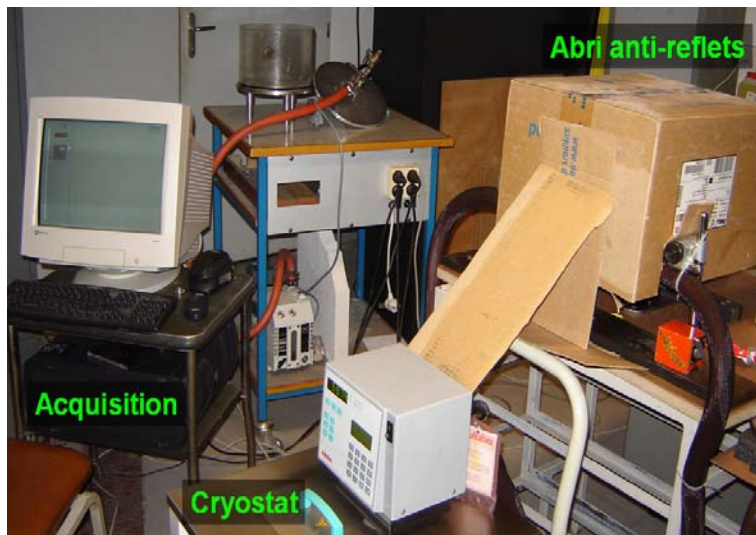


Figure 48: Photo de l'expérience de calibration du pyromètre avec l'abri anti-reflets en place

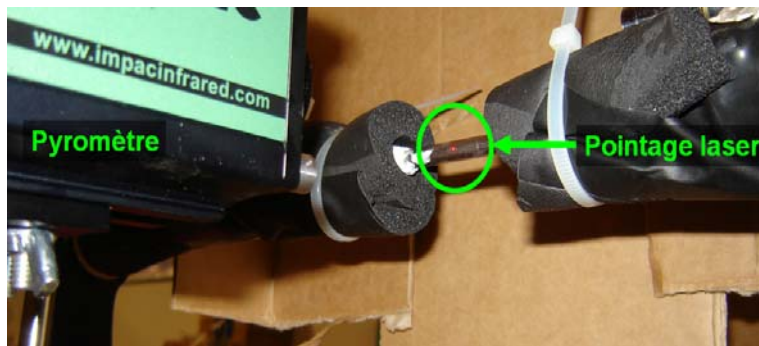


Figure 49: Pointage laser du pyromètre

## B Descriptif des expériences réalisées à l'entreprise Minutubes



Figure 50: Placement du pyromètre sur le banc d'étirage

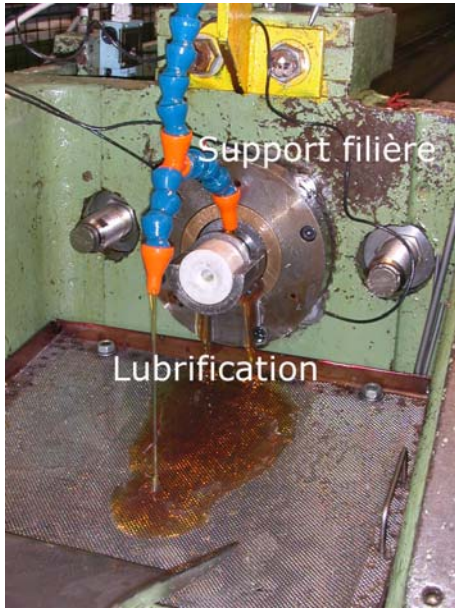


Figure 51: Système de lubrification



Figure 52: Capteurs d'efforts



Figure 53: Chariot d'étirage