

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE, CONCENTRATION GÉNIE AÉROSPATIAL  
M. Sc. A.

PAR  
Hélyette RUSSO

SIMULATION EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE DES CYCLES THERMIQUES ET  
MÉCANIQUES SUBIS PAR UNE CULASSE DE MOTEUR DIESEL EN ALLIAGE  
D'ALUMINIUM

MONTREAL, LE 18 JANVIER 2016



Hélyette Russo, 2016



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Philippe Bocher, Directeur de mémoire  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Ricardo Zednik, Président du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Vincent Demers, Membre du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 11 JANVIER 2016

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE





## REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de mémoire, Philippe Bocher, pour m'avoir permis de réaliser ce travail ainsi que pour sa confiance tout au long de ma maîtrise.

Je remercie Pierre Vermette, coordonnateur du laboratoire « Mining and Materials Engineering Department » de l'université McGill, Michel Drouin, chargé de l'application technologique et informatique au département de génie mécanique de l'ETS, et Serge Plamondon, technicien de l'application technologique et informatique au département de génie mécanique de l'ETS, qui m'ont aidé à différents moments de mon travail. Ils ont accepté de partager leurs connaissances et leur temps pour faire avancer mon travail.

Je souhaite aussi remercier Nicolas Vanderesse, auxiliaire de recherche au sein du Laboratoire d'Optimisation des Procédés de Fabrication en Aérospatial (LOPFA) pour sa disponibilité lors de mes tests expérimentaux. Ce fut long mais il a toujours trouvé le temps de venir m'aider.

Enfin, je souhaite remercier Lucas ainsi que ma famille pour leur soutien sans faille pendant toute la durée de ce projet. Ils ont su me remobiliser lorsque j'en avais besoin et n'ont cessé de croire en moi pendant ces deux années passées sur ce projet.



# **SIMULATION EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE DES CYCLES THERMIQUES ET MECANIQUES SUBIS PAR UNE CULASSE DE MOTEUR DIESEL EN ALLIAGE D'ALUMINIUM**

Hélyette RUSSO

## **RÉSUMÉ**

La réduction de consommation de carburant est un défi qui exige l'allègement des véhicules automobiles. Cela passe par le remplacement de la fonte par l'alliage A356 d'aluminium pour les culasses de moteur Diesel. Cet alliage est un candidat de choix du fait de ces bonnes propriétés de coulabilité mais des fissures apparaissent dans les pièces avant la fin de la durée de vie prévue en fatigue. Ces fissures sont dues à l'interaction du fluage avec la fatigue thermique ayant lieu dans les culasses.

Dans ce travail, un banc d'essai a été conçu afin de pouvoir tester des éprouvettes sur des cycles thermiques avec maintien à haute température. Les éprouvettes ont une géométrie particulière qui reprend celle des pontets inter-soupapes, parties les plus à risque des culasses. Plusieurs éprouvettes sont testées, avec des variations de composition de l'alliage et des variations de traitements thermiques. Les résultats expérimentaux obtenus montrent que les déformations mécaniques développées dans les éprouvettes sont faibles et que leur exploitation n'est pas possible sans la connaissance du coefficient de dilatation de l'alliage.

Une simulation numérique du montage a aussi été réalisée afin de pouvoir compléter les résultats expérimentaux et envisager des améliorations. Cette dernière montre qu'en fin de chauffe d'un cycle thermique, le centre de l'éprouvette subit des déformations plastiques de compression alors que la surface est en tension élastique s'il y a un jeu dans le montage. Sans jeu, toute l'éprouvette est en compression mais la surface n'est pas sujette à des déformations plastiques.

**Mots-clés :** Aluminium, A356, Moteur Diesel, fatigue, fluage



# **NUMERICAL AND EXPERIMENTAL SIMULATION OF THERMAL AND MECHANICAL CYCLES SUFFERED BY AN ALUMINIUM ALLOY DIESEL ENGINE CYLINDER HEAD**

Hélyette RUSSO

## **ABSTRACT**

Reducing fuel consumption is a challenge which demands a reduction of weight of vehicles. This includes replacing cast iron with A356 aluminium alloy for Diesel engine cylinder heads. This alloy is a good candidate because of great casting properties, but cracks appear in the parts before the end of the fatigue lifetime. These cracks are due to the interaction between creep and fatigue which takes place in the cylinder heads.

In this work, a bench test is created in order to test samples on thermal cycles with a high temperature dwell time. The sample geometry is similar to an intervalve bridge, the most susceptible part for cracks in cylinder heads. Many samples are tested, with varying alloy compositions and heat treatments. Experimental results show that the mechanical strain levels reached are low and a complete analysis is not possible without knowing the alloy dilatation coefficient.

A numerical simulation of the bench test has also been performed in order to complement the experimental results and identify improvements. This simulation shows that at the end of one heating, the middle of the sample is under plastic compression and the surface is under elastic tension if there is a geometrical gap between sample and frame. If there is no such a gap, all the sample is under compression.

**Keywords:** Aluminium, A356, Diesel engine, Fatigue, Creep



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	3
1.1 Mise en contexte .....	3
1.2 Présentation de l'alliage A356 .....	5
1.2.1 Propriétés générales .....	5
1.2.2 Microstructure de l'alliage A356 .....	6
1.2.2.1 Microstructure de base .....	6
1.2.2.2 Modification de l'alliage A356 par ajouts d'éléments .....	9
1.2.3 Traitements thermiques .....	11
1.2.4 Effet de la température sur les propriétés mécaniques de l'alliage .....	11
1.2.4.1 Déformations thermiques .....	11
1.2.4.2 Module d'élasticité et limite d'écoulement .....	12
1.3 Fatigue, fluage et interaction fatigue fluage pour l'alliage A356 .....	15
1.3.1 Phénomène de fatigue .....	15
1.3.1.1 Mécanisme de rupture dans l'alliage A356 .....	16
1.3.1.2 Influence de l'espace interdendritique .....	16
1.3.1.3 Effet des défauts de coulée et des oxydes .....	18
1.3.1.4 Effet du strontium sur la durée de vie .....	20
1.3.2 Phénomène de fluage .....	21
1.3.2.1 Mécanismes de fluage .....	23
1.3.2.2 Réduction de la vitesse de fluage .....	23
1.3.3 Ajout de cuivre et de molybdène dans l'alliage A356 .....	24
1.3.3.1 Ajout de cuivre .....	25
1.3.3.2 Ajout de molybdène .....	25
1.3.4 Interaction fatigue-fluage .....	26
1.4 Bilan de cette revue et objectif de l'étude .....	27
CHAPITRE 2 DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE .....	29
2.1 Objectifs des tests .....	29
2.2 Choix des éléments constituant le banc d'essai .....	30
2.2.1 Éprouvettes .....	30
2.2.1.1 Géométrie .....	30
2.2.1.2 Matériau .....	33
2.2.1.3 Fabrication des éprouvettes .....	33
2.2.2 Cadre .....	37
2.2.2.1 Solution retenue .....	37
2.2.2.2 Matériau et fabrication .....	38
2.2.3 Solution de chauffage et de refroidissement .....	39
2.2.3.1 Chauffage .....	39

2.2.3.2	Refroidissement .....	42
2.2.3.3	Maintien de la température maximale.....	43
2.2.3.4	Contrôle du chauffage et du refroidissement.....	43
2.2.4	Suivi du déplacement et obtention des déformations .....	44
2.2.4.1	Obtention des images.....	46
2.2.4.2	Corrélation d'images sous OpenDic .....	47
2.2.4.3	Obtention des déplacements et déformations .....	50
2.3	Protocole expérimental .....	54
2.4	Tests réalisés .....	55
CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET ANALYSES.....		59
3.1	Dépouillement des résultats .....	59
3.1.1	Durée des cycles .....	59
3.1.2	Traitement pour les images.....	60
3.2	Durée des cycles .....	62
3.3	Suivi ponctuel de cycles pour un test de 3000 cycles.....	63
3.3.1	Comparaison des évolutions de la température et des déformations .....	63
3.3.2	Évolution des déformations au cours du temps .....	64
3.4	Déformations sur 500 cycles.....	67
3.4.1	Résultats par éprouvettes .....	67
3.4.1.1	Éprouvette n°1 (A356+0,5Cu+0,15Mo+Sr sans vieillissement).....	67
3.4.1.2	Éprouvette n°2 (A356+0,5Cu+0,15Mo+Sr avec vieillissement).....	68
3.4.1.3	Éprouvette n°3 (A356+0,5Cu+Sr avec vieillissement).....	69
3.4.2	Effet du vieillissement et du molybdène.....	70
3.4.2.1	Effet du Vieillissement .....	71
3.4.2.2	Effet du Molybdène .....	74
3.5	Bilan de l'étude expérimentale .....	76
CHAPITRE 4 SIMULATION NUMÉRIQUE.....		77
4.1	Géométrie et données matériaux.....	77
4.1.1	Géométrie.....	77
4.1.2	Propriétés des matériaux.....	78
4.1.3	Définition des contacts.....	79
4.2	Conditions thermiques et mécaniques .....	79
4.2.1	Conditions thermiques .....	80
4.2.2	Conditions mécaniques .....	81
4.3	Maillage et convergence .....	82
4.4	Résultats.....	84
4.4.1	Température .....	85
4.4.1.1	Chauffage.....	85
4.4.1.2	Maintien à 300 °C .....	86
4.4.2	Déformations.....	89
4.4.3	Contraintes de Von Mises et normales .....	92
4.4.4	Effet des jeux .....	94
4.5	Bilan de la simulation numérique .....	96



CONCLUSION.....	97
RECOMMANDATIONS .....	99
ANNEXE I      PLAN DES ÉLÉMENTS DU MONTAGE TELS QU'USINÉS.....	101
ANNEXE II      COMPOSITION EXACTE DES PLAQUES COULÉES À L'UNIVERSITÉ MCGILL.....	105
ANNEXE III     PROGRAMME LABVIEW CONTRÔLANT LES CYCLES DE TEMPÉRATURE .....	107
ANNEXE IV     ANALYSE D'IMAGES : COMMENT IDENTIFIER LES PHOTOS DONNANT DES ERREURS.....	109
ANNEXE V      SIMULATION NUMÉRIQUE AVEC ANSYS WORKBENCH .....	113
BIBLIOGRAPHIE.....	115



## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Composition de l'alliage A356 selon la norme ASTM.....5
Tableau 1.2	Propriétés physiques et mécaniques de l'A356. Données tirées de Barlas (2004).....6
Tableau 1.3	Déformations thermiques théoriques.....12
Tableau 1.4	Effet de l'ajout de cuivre sur les contraintes d'écoulement et contraintes à rupture. Tirées de Garat (2007).....25
Tableau 2.1	Dimensions mesurées .....31
Tableau 2.2	Dimensions des éprouvettes choisies .....32
Tableau 2.3	Composition des éprouvettes disponibles pour le projet.....36
Tableau 2.4	Dimensions globales du montage.....38
Tableau 2.5	Caractéristiques des cartouches chauffantes.....41
Tableau 2.6	Tests prévus pour chaque éprouvette.....56
Tableau 2.7	Paramètres des essais effectués .....57
Tableau 3.1	Rappel des compositions des éprouvettes testées dans ce projet .....59
Tableau 3.2	Composition des éprouvettes testées sur 500 cycles .....67
Tableau 3.3	Déformations thermiques en fonction du coefficient d'expansion thermique $\alpha$ .....71
Tableau 4.1	Propriétés des matériaux utilisés dans la simulation numérique .....79
Tableau 4.2	Conditions de rayonnement et convection .....80
Tableau 4.3	Conditions aux limites appliquées.....81
Tableau 4.4	Comparaison des différents maillages.....83



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Comparaison alliage d'aluminium et fonte. Tirée de Ghodrat (2013) .....4
Figure 1.2	Culasses de moteur diesel (a) et zoom sur une fissure (b). Tirées de Barlas (2004) .....5
Figure 1.3	Schéma de dendrite, illustration de l'espace dendritique. Tiré de Juan, Zeng et Along (2007).....7
Figure 1.4	Principe de la croissance de l'eutectique. Tiré de Barralis et Maeder (2005)8
Figure 1.5	Microstructure de l'alliage A356. Tirée de Barlas et al. (2002) .....8
Figure 1.6	Microstructure à faible DAS $\approx$ 20-30 $\mu$ m (a), large DAS $\approx$ 70-80 $\mu$ m (b) et très large DAS $\approx$ 150-170 $\mu$ m (c). Tirées de Lados, Apelian et Donald (2006)9
Figure 1.7	Microstructure de l'alliage A356 modifiée au Sr (a) et non modifiée (b). Tirées de Wang, Apelian et Lados (2001b) .....10
Figure 1.8	Module d'Young en fonction de la température. Tiré de Angeloni (2011).13
Figure 1.9	Contraintes d'écoulement (a) et contraintes à rupture (b) obtenues pour des tests de traction à différentes températures pour l'alliage A356. Tirées de Angeloni (2011).....14
Figure 1.10	Comparaison des propriétés mécaniques en traction pour l'alliage A356 à 300 °C, avec Mo (MG3R3M) ou non (MG3R), après 100 h à 300 °C. Tirée de Farkoosh, Grant Chen et Pekguleryuz (2014).....15
Figure 1.11	Courbe S-N pour un alliage A356. Tirée de Zeng et al. (2014) .....16
Figure 1.12	Durée de vie en fonction du DAS. Tirée de Wang, Apelian et Lados (2001b) .....17
Figure 1.13	Influence du SDAS pour la propagation. Tirée de Lados, Apelian et Donald (2006) .....18
Figure 1.14	Image MEB de défauts (pores). Tirée de Wang, Apelian et Lados (2001a)18
Figure 1.15	Influence des pores sur la durée de vie pour deux SDAS : 20-25 $\mu$ m (a) et 70-75 $\mu$ m (b) pour l'alliage A356. Tirée de Wang, Apelian et Lados (2001a).....19

## XVIII

Figure 1.16	Observation au microscope d'oxyde dans un alliage A356. Tirée de Wang, Apelian et Lados (2001a).....	20
Figure 1.17	Durée de vie pour un alliage A356 modifié (a) ou non modifié (b) en fonction du SDAS. Tirées de Wang, Apelian et Lados (2001b) .....	21
Figure 1.18	Courbe de fluage. Tirée de Saint-Antonin (1999) .....	22
Figure 1.19	Principe d'augmentation de la résistance au fluage des alliages. Tiré de Farkoosh, Chen et Pekguleryuz (2013).....	24
Figure 1.20	Comparaison du comportement en fluage en traction (a) et compression (b) pour l'alliage A356, modifié au molybdène (MG3R3M) ou non (MG3R). Tirée de Farkoosh, Grant Chen et Pekguleryuz (2014) ...	26
Figure 2.1	Culasse de moteur diesel (en fonte) utilisée pour les dimensions .....	31
Figure 2.2	Modélisation des éprouvettes, géométrie retenue.....	32
Figure 2.3	Éprouvette en sortie d'usinage .....	33
Figure 2.4	Creuset pour préparation de l'alliage.....	34
Figure 2.5	Coulée de l'alliage .....	35
Figure 2.6	Plaque obtenue après coulée.....	35
Figure 2.7	Microstructure des alliages obtenus : A356+0,5Cu (a), et A356+0,5Cu+0,15Mo (b). Tirées de Ezan (2014) .....	36
Figure 2.8	Montage expérimental sous CATIA.....	38
Figure 2.9	Pièce utilisée pour le cadre .....	39
Figure 2.10	Montage des éléments chauffants.....	40
Figure 2.11	Élément chauffant brisé .....	40
Figure 2.12	Cartouche chauffante.....	41
Figure 2.13	Positionnement des cartouches chauffantes et flux de chaleur.....	41
Figure 2.14	Positionnement des différents éléments du montage.....	42
Figure 2.15	Flux de refroidissement .....	43
Figure 2.16	Emplacement du thermocouple .....	44

Figure 2.17	Localisation de l'analyse des déformations .....	45
Figure 2.18	Fonctionnement de la corrélation d'images .....	45
Figure 2.19	Suivi de la déformation par caméra.....	46
Figure 2.20	Image prise avec la caméra.....	47
Figure 2.21	Onglet « images » du logiciel OpenDic.....	48
Figure 2.22	Masque utilisé pour l'analyse sous OpenDIC .....	49
Figure 2.23	Onglet « parameters » du logiciel OpenDic .....	50
Figure 2.24	Résultats sous Fiji/ImageJ pour une image particulière .....	51
Figure 2.25	Choix de la zone utile pour les déformations .....	52
Figure 2.26	Évolution des cartes de déformations obtenues pour l'éprouvette 1 : cycle 1 (a), cycle 230 (b), cycle 500 (c) .....	53
Figure 2.27	Moyenne des déformations et écart type pour l'éprouvette 1 .....	53
Figure 3.1	Représentation schématique du traitement des données pour la durée des cycles thermiques .....	60
Figure 3.2	Schéma de la procédure de tri des images.....	61
Figure 3.3	Choix des images en fonction de la température.....	61
Figure 3.4	Variations des durées de cycles pendant les 10 premiers cycles.....	62
Figure 3.5	Évolution de la température et de la déformation $\varepsilon_{xx}$ pour l'éprouvette 4 lors des cycles 1900 à 1902.....	64
Figure 3.6	Déformations $\varepsilon_{xx}$ en fonction du temps pour l'éprouvette 4 .....	65
Figure 3.7	Déformations $\varepsilon_{xx}$ en fonction de la température pour différents cycles pour l'éprouvette 4.....	66
Figure 3.8	Déformation $\varepsilon_{xx}$ en fonction du temps pour l'éprouvette 1.....	68
Figure 3.9	Déformations $\varepsilon_{xx}$ en fonction du temps pour l'éprouvette 2 .....	69
Figure 3.10	Déformations $\varepsilon_{xx}$ en fonction du temps pour l'éprouvette 3 .....	70

Figure 3.11	Comparaison de la déformation mécanique $\epsilon_{xx}$ pour des éprouvettes A356+0,5Cu+0,15Mo+Sr avec (Éprouvette 2) ou sans vieillissement (Éprouvette 1) à 300 °C avec coefficient d'expansion thermique $\alpha=23,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .....	72
Figure 3.12	Comparaison de la déformation mécanique $\epsilon_{xx}$ pour des éprouvettes A356+0,5Cu+0,15Mo+Sr avec (Éprouvette 2) ou sans vieillissement (Éprouvette 1) à 300 °C avec coefficient d'expansion thermique $\alpha=25,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .....	73
Figure 3.13	Comparaison de la déformation mécanique $\epsilon_{xx}$ à 300 °C pour les éprouvette 2 (avec Mo) et 3 (sans Mo), sans déformation thermique, avec coefficient d'expansion thermique $\alpha=23,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .....	74
Figure 3.14	Comparaison de la déformation mécanique $\epsilon_{xx}$ à 300 °C pour les éprouvettes 2 (avec Mo) et 3 (sans Mo), sans déformation thermique, avec coefficient d'expansion thermique $\alpha=25,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .....	75
Figure 4.1	Géométrie utilisée dans le logiciel COMSOL, centre du montage (a) et faces libres (b) .....	78
Figure 4.2	Définition des surfaces de symétries, normales à la direction Z (a) et normales aux directions X et Y (b).....	81
Figure 4.3	Différents maillages testés, du plus fin (a) au plus grossier (e).....	82
Figure 4.4	Position du nœud avec le plus grand déplacement.....	83
Figure 4.5	Représentation de l'erreur relative des déplacements maximum au nœud identifié pour les maillages 2 à 5 par rapport au maillage le plus fin.....	84
Figure 4.6	Évolution de la température pendant 330 secondes de chauffe.....	85
Figure 4.7	Température (en °C) après 306 secondes de chauffe .....	86
Figure 4.8	Évolution de la température pendant 30 secondes de maintien en fonction de la puissance appliquée .....	87
Figure 4.9	Température (en °C) dans le modèle après 30 secondes de maintien .....	88
Figure 4.10	Températures (en °C) après 30 secondes de maintien au centre de l'éprouvette (a) dans le plan XY horizontal et (b) dans le plan YZ vertical.....	88
Figure 4.11	Déformations $\epsilon_{zz}$ totales et mécaniques (a) et localisation des déformations (b), en fin de chauffe et en fin de maintien .....	89



Figure 4.12	Déformations élastiques $\varepsilon_{zz}$ (a) et localisation des déformations (b), en fin de chauffe et en fin de maintien .....90
Figure 4.13	Déformations $\varepsilon_{zz}$ totales et mécaniques (a) et localisation des déformations (b), en fin de chauffe et en fin de maintien .....91
Figure 4.14	Contraintes de Von Mises (en MPa) dans le montage en fin de maintien...92
Figure 4.15	Contraintes de Von Mises sur la longueur (a) et localisation des contraintes (b), en fin de maintien.....93
Figure 4.16	Contraintes de Von Mises et principales dans les directions X, Y et Z (a) et localisation des contraintes (b) en fin de maintien.....94
Figure 4.17	Déformations élastiques $\varepsilon_{zz}$ (a) et localisation des déformations (b), en fin de maintien .....95
Figure 4.18	Contraintes de Von Mises (a) et localisation des contraintes (b) en fin de maintien .....95



## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AFNOR	Association Française de Normalisation
ASTM	American Society for Testing and Materials
DAS	Dendrite Arm Spacing
E	Module d'élasticité ou Module d'Young
EAA	European Aluminium Association
HCF	High Cycle Fatigue
LCF	Low Cycle Fatigue
MEB	Microscope Électronique à Balayage
N	Nombre de cycles
R	Rapport de charge
S	Contrainte
SDAS	Secondary Dendrite Arm Spacing
$T_f$	Température de fusion
$\alpha$	Coefficient de dilatation thermique
$\Delta T$	Variation de température
$\Delta\sigma$	Variation de contrainte
$\varepsilon$	Déformation
$\varepsilon_{th}$	Déformation thermique
$\varepsilon_{xx}$	Déformation élastique dans la direction x
$\varepsilon_{zz}$	Déformation élastique dans la direction z
$\sigma$	Contrainte

$\sigma_i$	Contrainte principale
$\sigma_m$	Contrainte moyenne
$\sigma_r$	Contrainte à rupture
$\sigma_{y0,2\%}$	Contrainte d'écoulement plastique

## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

### UNITÉS DE LONGUEUR

m	mètre
cm	centimètre
mm	millimètre
µm	micromètre
nm	nanomètre

### UNITÉS DE TEMPÉRATURE

°C	degré celsius
K	kelvin

### UNITÉS DE PRESSION

MPa	mégapascal
GPa	gigapascal

### UNITÉS DE MASSE

kg	kilogramme
kg/m <sup>3</sup>	masse volumique

### UNITÉS DE TEMPS

h	heure
s	secondes
J	joule (Énergie)
W	watt (Puissance)
V	volt (Tension)

### ELÉMENTS ATOMIQUES ET CHIMIQUES

Al	aluminium
Cu	cuivre
Fe	fer
Mg	magnésium
Mn	manganèse
Mo	molybdène
Si	silicium
Sr	strontium
Ti	titane
Zn	zinc
Zr	zirconium
O <sub>2</sub>	oxygène
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxyde d'aluminium



## INTRODUCTION

Dans l'industrie automobile, la réduction de la consommation de carburant est un défi majeur qui implique l'allègement des véhicules. Pour ce faire, l'utilisation de matériaux métalliques à faible densité est nécessaire. Dans le cas des véhicules à moteur diesel, le remplacement de culasses en fonte par des culasses en alliage d'aluminium A356 est étudié depuis plusieurs années.

L'alliage A356 est un bon candidat pour remplacer la fonte car il présente de meilleures propriétés spécifiques. Seulement, les conditions moteur sont sévères : pour chaque cycle d'utilisation du véhicule, la culasse est chauffée jusqu'à des températures pouvant atteindre 300 °C, température maintenue pendant la durée d'utilisation du véhicule. Il a été constaté que des fissures apparaissent au niveau des pontets inter-soupapes et ce avant que la durée de vie déterminée en fatigue soit atteinte. Le processus de fluage a lieu pendant le maintien à haute température et entraîne la ruine des pièces plus rapidement qu'en fatigue pure. Les fissures apparaissent pour les moteurs diesel et non pour les moteurs à allumage commandé car les conditions de température et de pression dans les cylindres sont plus importantes, indépendamment du temps de cycle moteur. Ces conditions entraînent une température plus élevée pour la culasse de moteur diesel.

Ce travail de recherche a alors pour but de mettre en place une méthode simple pour connaître la réponse mécanique aux cycles thermiques subis par les culasses. Pour atteindre cet objectif, il est proposé de créer un banc d'essai permettant de reproduire expérimentalement les conditions thermiques et mécaniques pour les zones critiques des culasses de moteur diesel, soit les pontets inter-soupapes. La mise en place de ce banc d'essai est faite parallèlement à une simulation numérique de ce même banc d'essai pour faire une étude la plus complète possible.

Ce travail est composé de quatre parties : la première est une revue de la littérature ayant pour objectif de présenter l'alliage utilisé dans ce projet ainsi que d'expliquer succinctement ce qu'est la fatigue et le fluage. Le deuxième chapitre présente la démarche expérimentale suivie dans ce projet alors que le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus. Enfin, une dernière partie présente la simulation numérique effectuée dans le but de compléter les résultats expérimentaux.



## CHAPITRE 1

### REVUE DE LA LITTÉRATURE

L'objectif de cette revue de la littérature est de présenter dans un premier temps l'alliage A356, alliage qui sera utilisé dans cette étude. Ensuite, les phénomènes de fatigue et de fluage seront présentés, avant de finir par un aperçu de l'interaction fatigue fluage.

#### 1.1 Mise en contexte

Malgré sa faible densité, l'aluminium pur est peu utilisé dans l'industrie du fait de ses faibles propriétés mécaniques (Mondolfo, 1976). En revanche, ajouter des éléments d'alliage, tels que le silicium, le cuivre, le magnésium ou encore le zinc, permet d'améliorer considérablement les propriétés mécaniques du métal pur par durcissement en solution solide ou par précipitation de phases, tout en gardant une densité très avantageuse. Les alliages d'aluminium sont particulièrement attractifs et utilisés dans de nombreux domaines comme l'aéronautique et l'automobile où la réduction de poids à iso-performance est primordiale. Cette réduction de poids permet de répondre à la problématique de réduction de carburant, défi important dans ces secteurs d'activités. Dans cette optique, les alliages d'aluminium sont amenés à remplacer les fontes.

La Figure 1.1 compare les propriétés d'un alliage d'aluminium avec deux types de fonte (Compact Graphite Iron, CGI, et Flake Graphite Iron, FGI). Si les propriétés mécaniques sont plus faibles, les propriétés spécifiques, ratio entre la propriété et la densité, sont meilleures pour les alliages d'aluminium que pour les fontes.

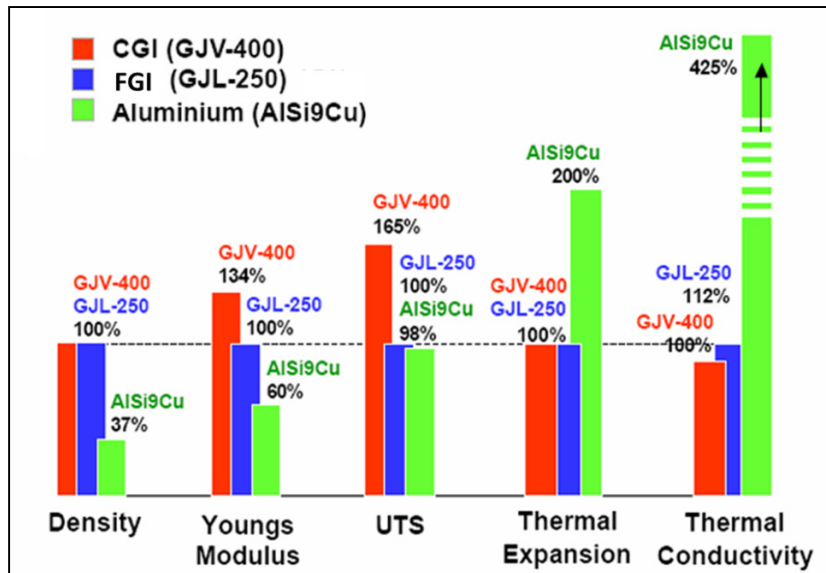


Figure 1.1 Comparaison alliage d'aluminium et fonte.  
Tirée de Ghodrat (2013)

Dans le domaine automobile, les alliages d'aluminium sont de plus en plus utilisés. En effet, on estime à 150 kg la masse totale des pièces en alliage d'aluminium dans un véhicule. En particulier, l'alliage coulé d'aluminium A356 (norme de l'American Society for Testing and Materials ou ASTM) ou AS7G (norme de l'Agence Française de Normalisation ou AFNOR) est utilisé dans les moteurs diesel, notamment pour les culasses (Figure 1.2). Cependant, les pièces sont soumises à des changements de température et/ou de chargements mécaniques ce qui peut aboutir à l'apparition de fissures au niveau du pontet inter-soupape.

En effet, les fissures sont le résultat des mécanismes de fatigue liée aux cycles start/stop subis par les véhicules, mais aussi de fluage car les pièces sont soumises à des cycles thermiques allant de l'ambiante à 300 °C, avec maintien à haute température, lors de l'utilisation du véhicule. Avec ces variations de température, des gradients de températures apparaissent dans la pièce, entraînant l'apparition de contraintes mécaniques à chaud, le pontet est en compression alors que lors du refroidissement, les gradients de température dans la pièce engendrent de la tension (Thalmair et al., 2006).

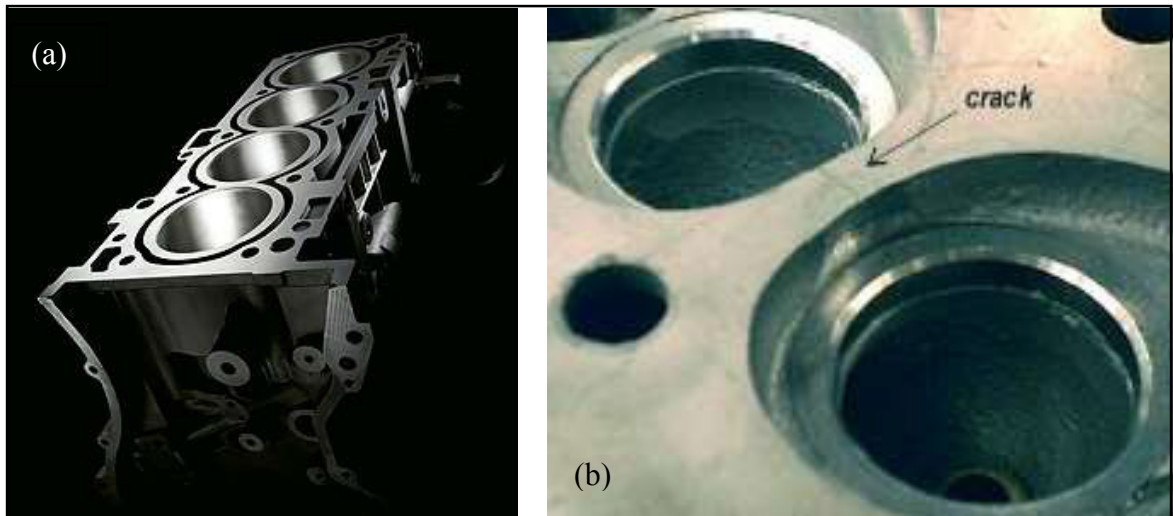


Figure 1.2 Culasses de moteur diesel (a) et zoom sur une fissure (b).  
Tirées de Barlas (2004)

## 1.2 Présentation de l'alliage A356

### 1.2.1 Propriétés générales

L'association Européenne de l'Aluminium (EAA) classe les alliages de fonderie en fonction de l'élément principal ajouté. L'alliage A356 appartient à la série 3xx.x, soit celle des alliages aluminium silicium avec ajout de cuivre et/ou magnésium. Sa composition est définie comme suit selon la norme ASTM (Tableau 1.1) :

Tableau 1.1 Composition de l'alliage A356 selon la norme ASTM

Élément	Si	Cu	Fe	Mg	Ti	Zn	Mn
% massique	6,5-7,5	0,2	0,2	0,25-0,45	0,2	0,1	0,1

Le silicium est l'élément principal de l'alliage. Il confère à l'alliage d'excellentes propriétés de coulabilité (Gupta, Lloyd et Court, 2001). Le cuivre a pour effet d'augmenter la dureté (Moizumi et al., 2002) alors que le magnésium augmente la résistance à la corrosion mais diminue les propriétés de fonderie ainsi que son usinabilité (Caceres et al., 1999).

Avec une telle composition de l'alliage, les propriétés physiques et mécaniques sont les suivantes (Tableau 1.2) :

Tableau 1.2 Propriétés physiques et mécaniques de l'A356 à 20 °C.  
Données tirées de Barlas (2004)

<b>Densité</b>	<b>(kg/m<sup>3</sup>)</b>	2685
<b>Conductivité thermique</b>	<b>(W/m.K)</b>	155
<b>Température de liquidus</b>	<b>(°C)</b>	615
<b>Coefficient de dilatation thermique entre 20 et 300 °C</b>	<b>(/°C)</b>	23,5·10 <sup>-6</sup>
<b>Module d'élasticité</b>	<b>(GPa)</b>	72,4
<b>Limite d'écoulement</b>	<b>(MPa)</b>	179
<b>Limite à rupture</b>	<b>(MPa)</b>	255
<b>Allongement à rupture</b>	<b>(%)</b>	5,0

## 1.2.2 Microstructure de l'alliage A356

### 1.2.2.1 Microstructure de base

Les alliages d'aluminium de fonderie ont une structure dendritique (Figure 1.3). En effet, les cristaux solides se forment sur les bords du moule (plus froid que le centre) et se développent vers le centre. Comme la solubilité du silicium dans l'aluminium décroît avec la température, la teneur en silicium de ces cristaux solides est plus faible que celle de l'eutectique autour. Le silicium se trouve rejeté vers la surface des cristaux et contribue à abaisser la température de solidification de l'eutectique dans cette zone par effet de surfusion (Barlas, 2004). Cette surfusion entraîne une solidification plus lente de l'eutectique car il y a plus de chaleur à évacuer. Cependant, si un germe de cristal solide arrive à percer la couche d'eutectique, il va pouvoir croître rapidement car il sera dans un état thermodynamique favorable et faible en silicium. La croissance des germes de cristaux solides se fait alors en dendrite plutôt que de façon sphérique car le germe est instable (Angeloni, 2011). L'espace entre les bras des

dendrites, appelé DAS (Dendrite Arm Spacing) ou SDAS (Secondary Dendrite Arm Spacing), varie entre une dizaine et une centaine de micromètres, dépendamment de la vitesse de refroidissement, alors que la taille de grain est de l'ordre du millimètre (Barlas, 2004).

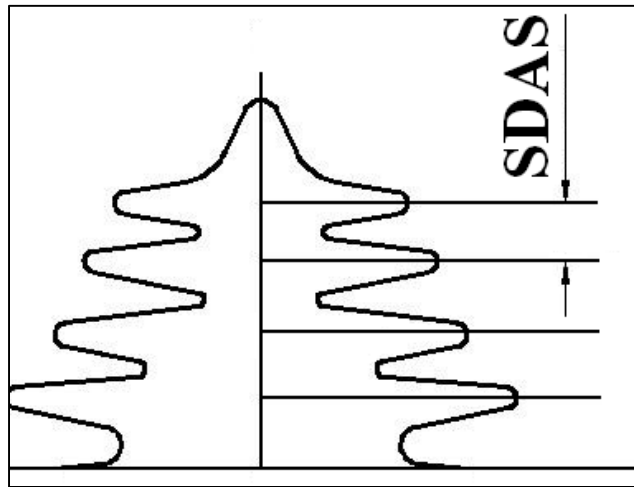


Figure 1.3 Schéma de dendrite, illustration de l'espace dendritique. Tiré de Juan, Zeng et Along (2007)

L'eutectique va alors se solidifier sous forme de lamelles dans l'espace interdendritique (Figure 1.4), zone riche en silicium. Il y a précipitation sous forme de plaquettes d'une phase d'aluminium presque pure (phase  $\alpha$ ) accompagnée d'une zone où le silicium en solution est drainé (phase  $\beta$ ) (Barlas et al., 2002). La microstructure de l'alliage est présentée sur la Figure 1.5.

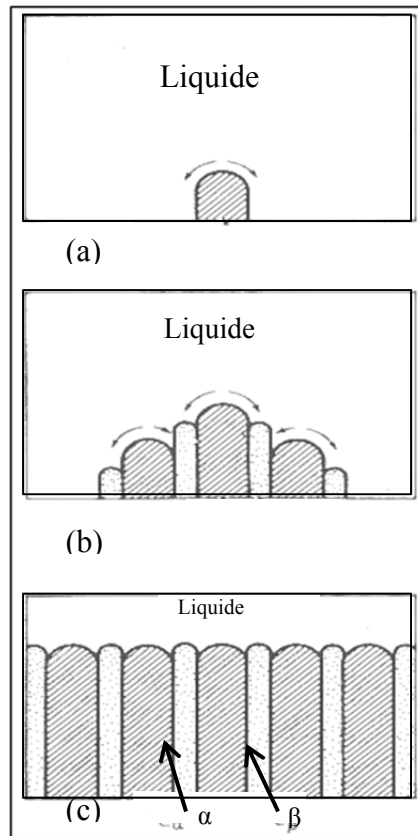


Figure 1.4 Principe de la croissance de l'eutectique. Tiré de Barralis et Maeder (2005)

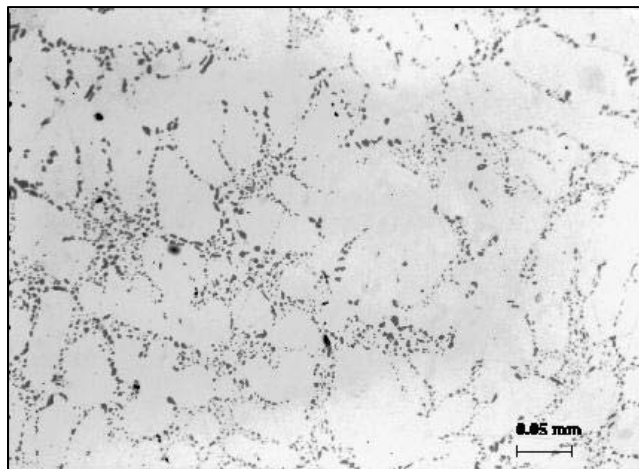


Figure 1.5 Microstructure de l'alliage A356. Tirée de Barlas et al. (2002)

La Figure 1.6 présente différentes microstructures obtenues avec des trois vitesses de solidification distinctes (5, 50 et 100  $\mu\text{m/s}$ ). La Figure 1.6 a présente la microstructure obtenue avec un taux de solidification de 100  $\mu\text{m/s}$ , Figure 1.6 b celle obtenue avec une vitesse de solidification de 50  $\mu\text{m/s}$  et la Figure 1.6 c celle obtenue avec une vitesse de solidification de 5  $\mu\text{m/s}$ . La microstructure la plus raffinée est obtenue avec la plus grande vitesse de refroidissement. La vitesse de refroidissement est donc un paramètre majeur influençant la finesse de la microstructure : plus le refroidissement est rapide, plus l'espace interdendritique est faible (Lados, Apelian et Donald, 2006).

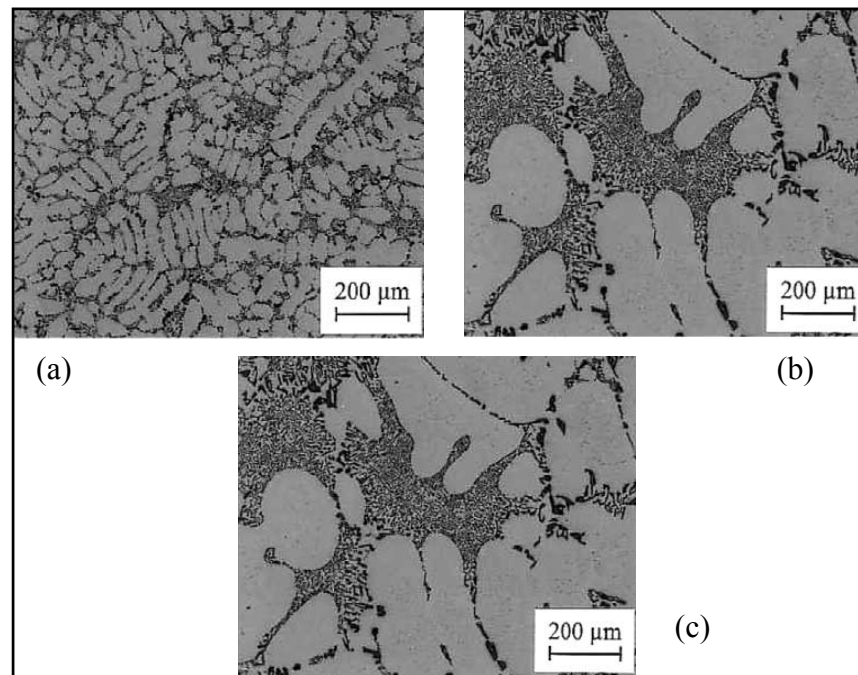


Figure 1.6 Microstructure à faible  $\text{DAS} \approx 20\text{-}30 \mu\text{m}$  (a), large  $\text{DAS} \approx 70\text{-}80 \mu\text{m}$  (b) et très large  $\text{DAS} \approx 150\text{-}170 \mu\text{m}$  (c). Tirées de Lados, Apelian et Donald (2006)

### 1.2.2.2 Modification de l'alliage A356 par ajouts d'éléments

On rencontre très souvent dans la littérature l'alliage A356 modifié au strontium ou au sodium (Figure 1.7). Ces deux éléments ont pour effet de modifier la structure eutectique naturellement lamellaire en eutectique globulaire (Liao, Ding et Sun, 2002) : les particules de

silicium sont plus sphériques avec la présence de strontium ou sodium (Figure 1.7 a.). On parle aussi de sphéroïdisation des particules de silicium. Cet effet se traduit par un usinage plus facile de l'alliage et une augmentation de la limite d'élasticité.

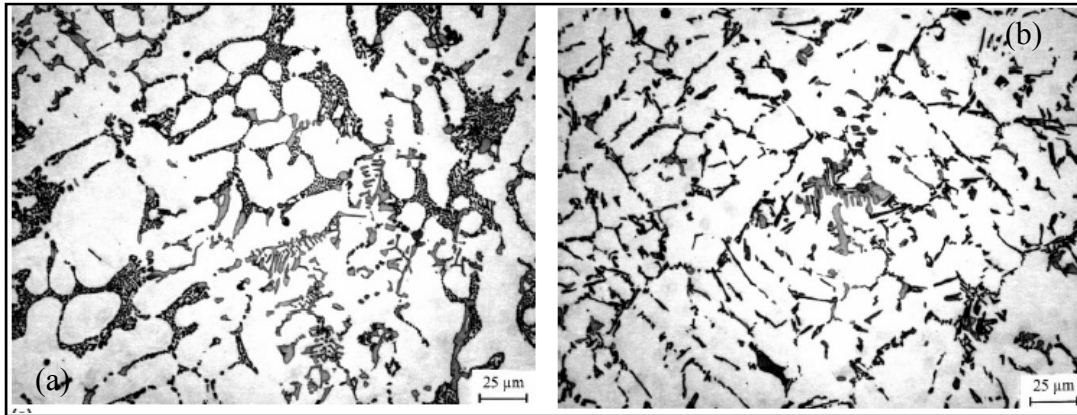


Figure 1.7 Microstructure de l'alliage A356 modifiée au Sr (a) et non modifiée (b).  
Tirées de Wang, Apelian et Lados (2001b)

D'autres éléments sont fréquemment ajoutés à la composition initiale de l'alliage A356. Le titane est un élément favorisant le raffinement des dendrites. Le manganèse peut également être ajouté dans l'optique d'augmenter la résistance de l'alliage à 300 °C (Farkoosh et Pegguleryuz, 2013) tout comme le nickel qui augmente la limite de la résistance en fatigue de 20 %. Le molybdène est aussi un ajout fait dans le but d'améliorer les propriétés de l'alliage à 300 °C.

Tous les éléments ne sont pas bénéfiques pour l'alliage, certains éléments sont des impuretés néfastes pour le comportement de l'alliage. Parmi ces éléments, le fer et le chrome fragilisent l'alliage car ils forment des composés intermétalliques durs et fragiles. À partir de ces composés, l'amorçage de fissure est plus facile dans l'alliage (Barlas, 2004). Le plomb peut annuler l'effet du strontium s'il est présent à plus de 0,05 % dans l'alliage. Le bore a le même effet, quel que soit sa concentration (Nogita et Dahle, 2003).

Les éléments présents se regroupent lors de la solidification de l'alliage pour former des précipités cohérents ou non avec la matrice.



### 1.2.3 Traitements thermiques

Pour modifier la résistance mécanique ou la dureté de l'alliage A356, il est possible de réaliser différents traitements thermiques (Boyer et Gall, 1991) :

- La mise en solution ou homogénéisation. Ce traitement permet la mise en solution solide de certains éléments d'alliages pour avoir une composition chimique uniforme. Lors de ce traitement, il peut y avoir des dissolutions de phases ou des modifications.
- La trempe est effectuée après l'homogénéisation et consiste en un refroidissement plus ou moins rapide, dépendamment de la technique utilisée, de l'alliage pour figer l'état obtenu sans passer par un changement de phase.
- Le revenu ou vieillissement est effectué après une trempe pour relaxer les contraintes internes qui ont été introduites par le choc thermique subi par l'alliage.

Ces traitements thermiques permettent de modifier la dureté ou le comportement mécanique de l'alliage.

### 1.2.4 Effet de la température sur les propriétés mécaniques de l'alliage

L'alliage A356 étant utilisé dans les moteurs diesel, il est important de connaître son comportement à 300 °C, température atteinte au pontet inter soupape des culasses de moteur diesel.

#### 1.2.4.1 Déformations thermiques

La dilatation thermique est quantifiée par le coefficient de dilatation  $\alpha$ . La déformation thermique induite par la dilatation est alors proportionnelle à ce coefficient selon la relation suivante :

$$\varepsilon_{th} = \alpha \Delta(T) \quad (1.1)$$

où  $\Delta(T)$  est la différence de température entre la température atteinte et la température de référence associée au coefficient  $\alpha$ . Ce dernier n'est pas nécessairement le même pour toutes les plages de températures car la dilatation n'est pas linéaire.

Pour l'alliage d'aluminium A356 commercial, le coefficient est estimé à  $23,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  entre  $20\text{ }^\circ\text{C}$  et  $300\text{ }^\circ\text{C}$  mais il est de  $21,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  entre  $0$  et  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Avec ces valeurs, les déformations thermiques pour différentes plages de températures sont données dans le Tableau 1.3.

Tableau 1.3 Déformations thermiques théoriques

<b>Plage de Température</b>	<b>Déformation</b>
Entre $20\text{ }^\circ\text{C}$ et $300\text{ }^\circ\text{C}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$
Entre $20\text{ }^\circ\text{C}$ et $50\text{ }^\circ\text{C}$	$7,05 \cdot 10^{-4}$
Entre $50\text{ }^\circ\text{C}$ et $300\text{ }^\circ\text{C}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$

#### 1.2.4.2 Module d'élasticité et limite d'écoulement

La température a pour effet de faire chuter les propriétés mécaniques de l'alliage A356. Le module d'Young, la contrainte d'écoulement et la contrainte à rupture sont plus faibles, comme le montre Angeloni dans sa thèse via des tests de traction réalisés à  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $120\text{ }^\circ\text{C}$  et  $280\text{ }^\circ\text{C}$  (Angeloni, 2011). Les tests sont réalisés sans que les éprouvettes soient exposées à  $120\text{ }^\circ\text{C}$  ou  $280\text{ }^\circ\text{C}$  au préalable et sans traitement thermique.

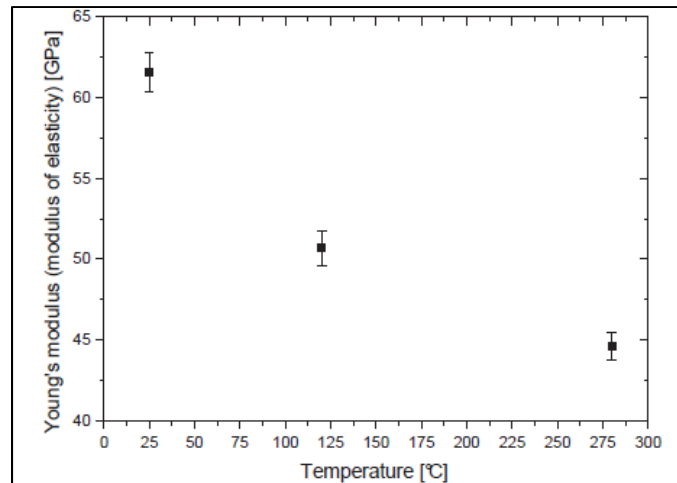


Figure 1.8 Module d'Young en fonction de la température. Tiré de Angeloni (2011)

Sur la Figure 1.8, l'évolution du module d'Young est donnée pour les trois températures d'essais. La valeur à 25 °C est faible par rapport à ce qui est donné au Tableau 1.2 ( $E=72,4$  GPa) mais la différence est justifiée par la composition de l'alliage utilisé qui n'est pas exactement la même. Entre 25 °C et 280 °C, une baisse de 30 % est enregistrée.

Sur la Figure 1.9, les contraintes d'écoulement  $\sigma_{y0,2\%}$  et contraintes à rupture sont explicitées. La Figure 1.9.a présente le début du test avec la partie élastique alors que la Figure 1.9.b présente seulement la fin du test de traction. Les valeurs décroissent lorsque la température augmente. La plasticité macroscopique est atteinte pour 80 MPa alors qu'à l'ambiante elle est atteinte pour 123 MPa et la rupture est atteinte après striction pour 52 MPa contre 182 MPa à l'ambiante.

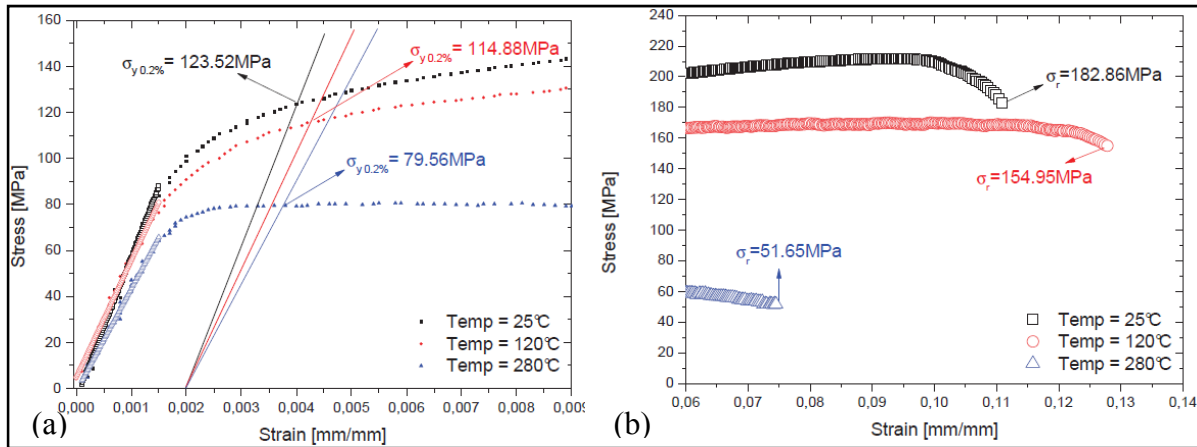


Figure 1.9 Contraintes d'écoulement (a) et contraintes à rupture (b) obtenues pour des tests de traction à différentes températures pour l'alliage A356. Tirées de Angeloni (2011)

D'autres travaux donnent les contraintes d'écoulement et à rupture à 300 °C de l'alliage A356 (Farkoosh, Grant Chen et Pekguleryuz, 2014). La Figure 1.10 présente les résultats de tests de traction effectués à 300 °C pour des échantillons ayant passé 100 heures à cette température avant le test afin d'homogénéiser la microstructure. Certains échantillons contenaient du molybdène. Les valeurs de contraintes à rupture et contraintes d'écoulement obtenues sur la Figure 1.10 pour l'alliage sans molybdène sont plus faibles que sur la Figure 1.9 à cause de l'état initial de l'alliage.

La Figure 1.10 montre que l'ajout de molybdène a un effet bénéfique sur l'allongement à rupture ainsi que les contraintes d'écoulement et contraintes à rupture (Figure 1.10) à 300 °C. Les propriétés sont respectivement améliorées de 35 %, 15 % et 25 % lorsque le molybdène est présent dans l'alliage (Farkoosh, Grant Chen et Pekguleryuz, 2014).

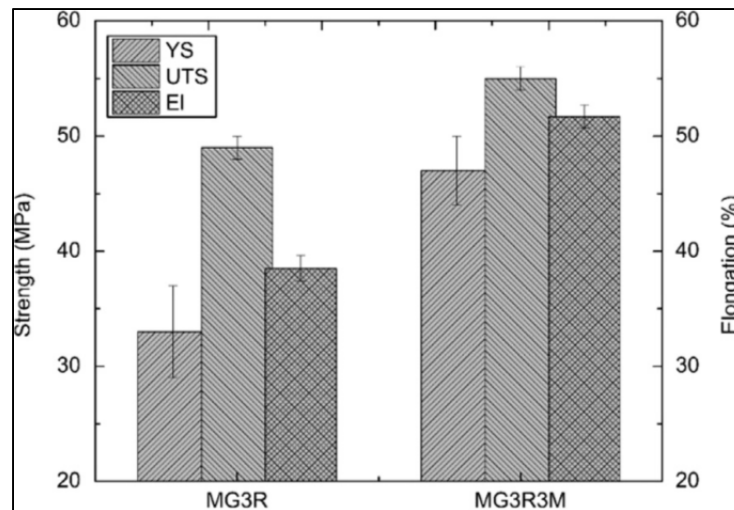


Figure 1.10 Comparaison des propriétés mécaniques en traction pour l'alliage A356 à 300 °C, avec Mo (MG3R3M) ou non (MG3R), après 100 h à 300 °C. Tirée de Farkoosh, Grant Chen et Pegguleryuz (2014)

### 1.3 Fatigue, fluage et interaction fatigue fluage pour l'alliage A356

La fatigue des culasses de moteur diesel est liée aux cycles start/stop des véhicules et non pas aux explosions du cycle moteur (Thalmair et al., 2006). Pour une durée de vie de 10 ans, on estime que les culasses subissent 7000 cycles démarrage-utilisation-arrêt mais avec l'implantation des systèmes start/stop dans les véhicules, ce chiffre augmente considérablement dépendamment du type de conduite de chaque utilisateur.

#### 1.3.1 Phénomène de fatigue

Selon la norme ASTM (ASTM, 2005), la fatigue est un procédé progressif de changement structural permanent et localisé ayant lieu dans un matériau soumis à des variations de contraintes et de déformations pouvant aboutir à des fissures après un nombre suffisant de fluctuations. En fatigue, une pièce peut rompre avec une contrainte inférieure à la contrainte de rupture connue en statique. Le mécanisme de fatigue peut être décomposé en trois parties : l'amorçage de fissures, la propagation puis la rupture finale.

### 1.3.1.1 Mécanisme de rupture dans l'alliage A356

L'amorçage de fissures, intervient le plus souvent au niveau d'un pore situé proche de la surface (Lados, Apelian et Major, 2006). La propagation a lieu de façon interdendritique dans un premier temps, dans la matrice et le long des interfaces silicium-matrice (Lados, Apelian et Major, 2006). Les particules de silicium sont plus dures et dans un premier temps, elles agissent alors comme obstacles à la propagation. Dans un deuxième temps, la propagation se fait de façon intradendritique. Pour finir, lorsque la fissure est longue, elle se propage de nouveau de façon interdendritique mais les particules de silicium sont cette fois fracturées et non plus contournées (Lados, Apelian et Major, 2006). Comme pour tous les matériaux, l'amorçage et la rupture finale dépendent de la charge appliquée (Figure 1.11) : plus celle-ci est élevée, plus la rupture intervient tôt. En revanche, l'A356 ne présente pas de limite d'endurance : la Figure 1.11 ne montre pas de contrainte pour laquelle la durée de vie est infinie.

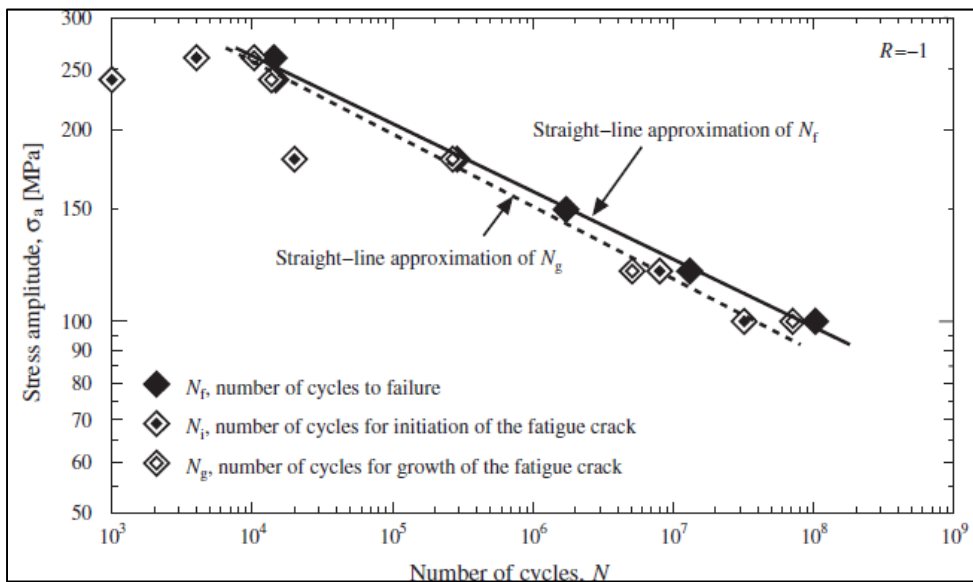


Figure 1.11 Courbe S-N pour un alliage A356. Tirée de Zeng et al. (2014)

### 1.3.1.2 Influence de l'espace interdendritique

La Figure 1.12 présente l'évolution de la durée de vie en fonction du SDAS pour l'alliage A356. Pour des faibles SDAS (entre 30 et 50  $\mu\text{m}$ ), plus l'espace interdendritique est faible,

plus la durée de vie est grande. Cette tendance n'est pas vraie lorsque l'on est dans des valeurs d'espaces moyennes (40-80  $\mu\text{m}$ ). En effet, sur la Figure 1.12 les auteurs montrent un palier pour une valeur de 60  $\mu\text{m}$ . Cela n'est pas dû à un défaut car la tendance est la même pour des échantillons traités HIP que pour des échantillons non traités. Ce serait plutôt l'effet conjoint des oxydes et bandes de glissement (Wang, Apelian et Lados, 2001b).

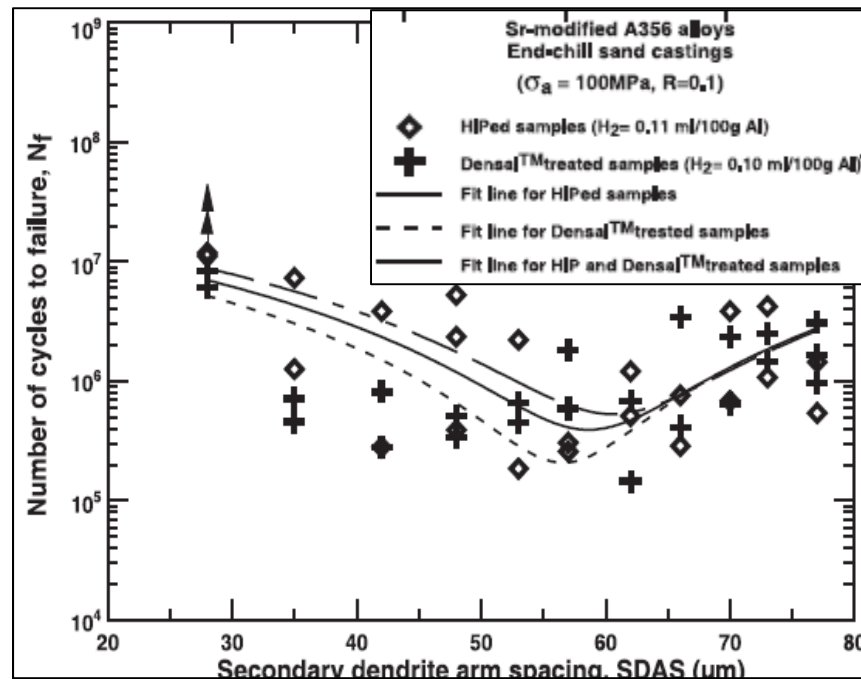


Figure 1.12 Durée de vie en fonction du DAS.  
Tirée de Wang, Apelian et Lados (2001b)

Le SDAS n'influence pas seulement la durée de vie, il a un effet sur tout le mécanisme de fatigue. En effet, le seuil de propagation n'est pas le même en fonction du SDAS. Plus l'espace est grand plus le seuil est retardé. Ce retard dans la propagation s'explique par le principe de fermeture de fissures, principe lui-même lié à la rugosité de l'alliage (Lados, Apelian et Donald, 2006). Il a été montré que plus l'espace interdendritique est grand, plus la surface de fissures est rugueuse donc le début de propagation est retardé par rapport à un alliage à faible espace interdendritique, du fait du mécanisme de fermeture de fissures (Figure 1.13). À l'inverse, la rupture interviendra plus tôt pour un grand espace interdendritique que pour un espace plus faible.

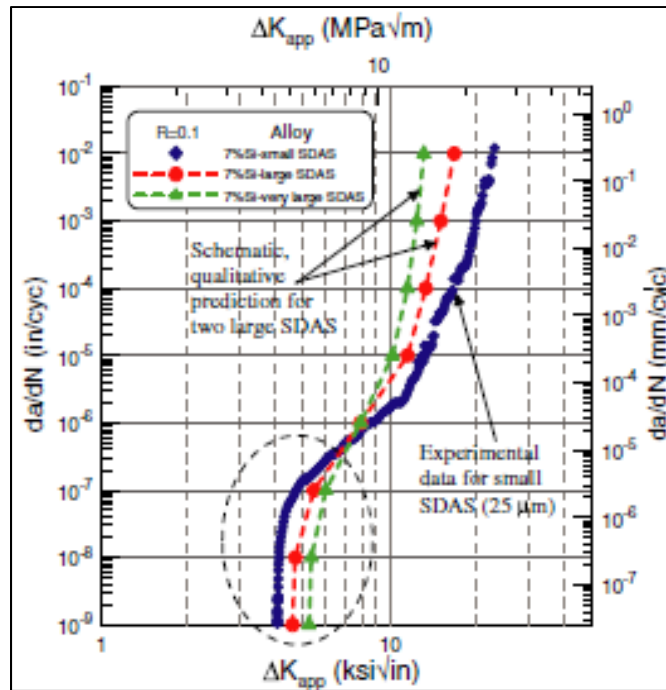


Figure 1.13 Influence du SDAS pour la propagation.  
Tirée de Lados, Apelian et Donald (2006)

### 1.3.1.3 Effet des défauts de coulée et des oxydes

L'amorçage de fissure se fait le plus souvent au niveau d'un pore (Figure 1.14), d'autant plus si celui-ci se situe proche de la surface de la pièce. La dimension des pores est un paramètre qui joue sur la durée de vie en fatigue.

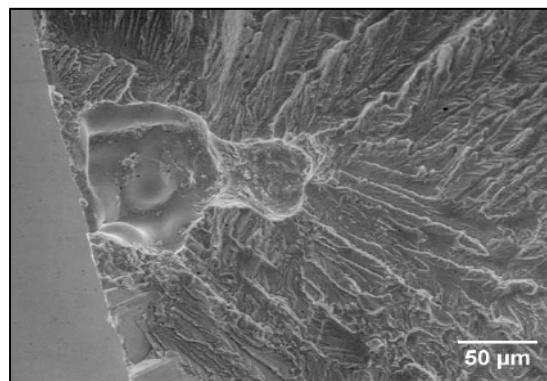


Figure 1.14 Image MEB de défauts (pores).  
Tirée de Wang, Apelian et Lados (2001a)



Comme présenté sur la Figure 1.15, plus le pore est gros, moins la durée de vie sera élevée et ce, quel que soit le niveau de chargement. Il est également possible de noter qu'il existe une taille critique de défaut en dessous de laquelle il n'y a pas d'influence sur la durée de vie. Cette taille est estimée à 25  $\mu\text{m}$  puisque en dessous, la durée de vie est la même que pour des échantillons sans défaut (traités HIP).

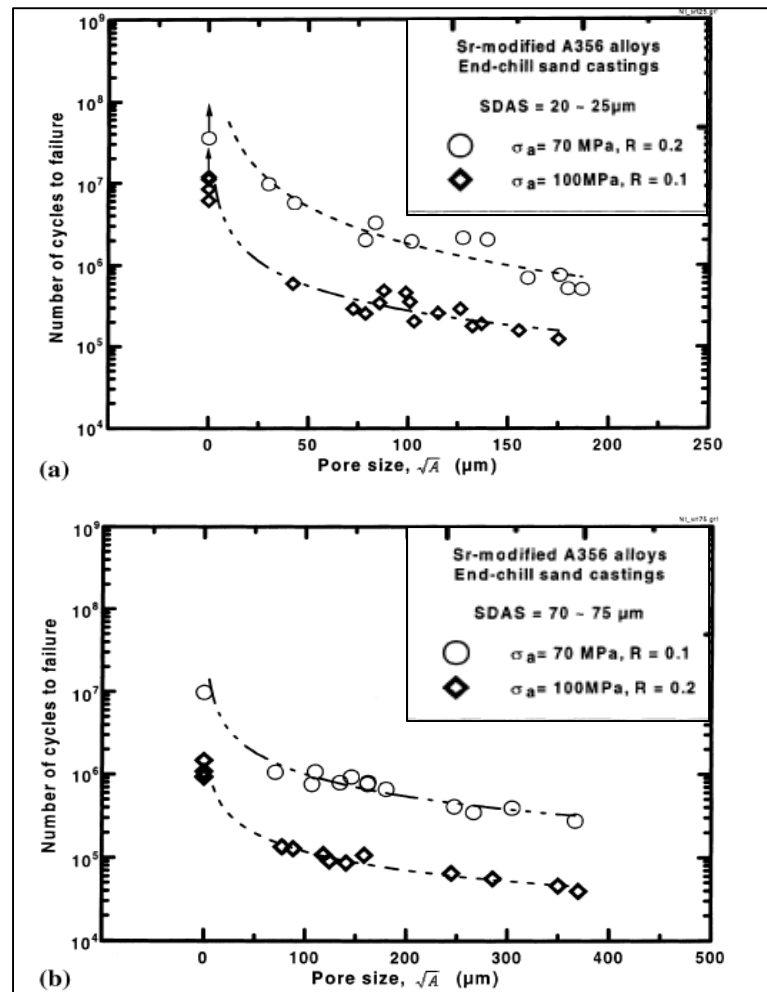


Figure 1.15 Influence des pores sur la durée de vie pour deux SDAS : 20-25  $\mu\text{m}$  (a) et 70-75  $\mu\text{m}$  (b) pour l'alliage A356. Tirée de Wang, Apelian et Lados (2001a)

En plus des défauts, l'effet de l'oxydation est à prendre en compte (Figure 1.16). L'aluminium est un élément très propice à l'oxydation selon la réaction :

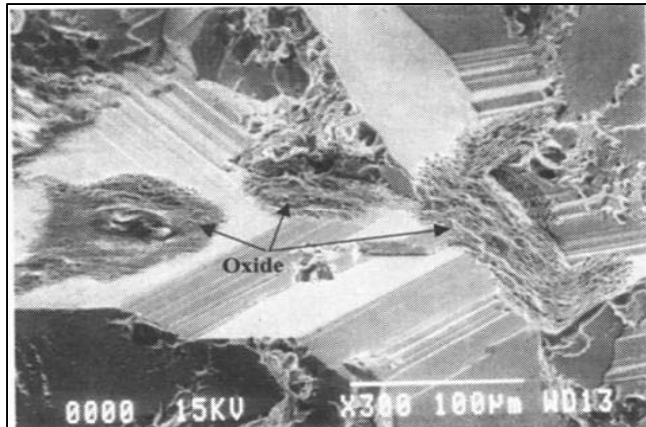


Figure 1.16 Observation au microscope d'oxyde dans un alliage A356. Tirée de Wang, Apelian et Lados (2001a)

La présence d'oxyde dans l'alliage peut entraîner une dégradation des propriétés en fatigue le rendant deux fois moins résistant (Wang, Apelian et Lados, 2001a). Cependant, la taille critique d'un oxyde est deux fois plus grande que celle d'un pore donc il n'y aura pas de fissure amorcée sur un oxyde si celui-ci ne mesure pas au moins 50 µm.

#### 1.3.1.4 Effet du strontium sur la durée de vie

Les ajouts d'éléments jouent aussi un rôle sur le comportement en fatigue de l'alliage. L'alliage A356 souvent modifié au strontium pour améliorer son usinage ne se comporte pas de la même façon avec ou sans cet élément. En effet, un alliage modifié au strontium sera meilleur qu'un alliage non modifié (Figure 1.17) et ce quel que soit l'espace interdendritique : quelque soit la composition de l'alliage et le SDAS, la Figure 1.17 montre que la durée de vie est toujours supérieure pour l'alliage modifié au strontium que pour celui non modifié.

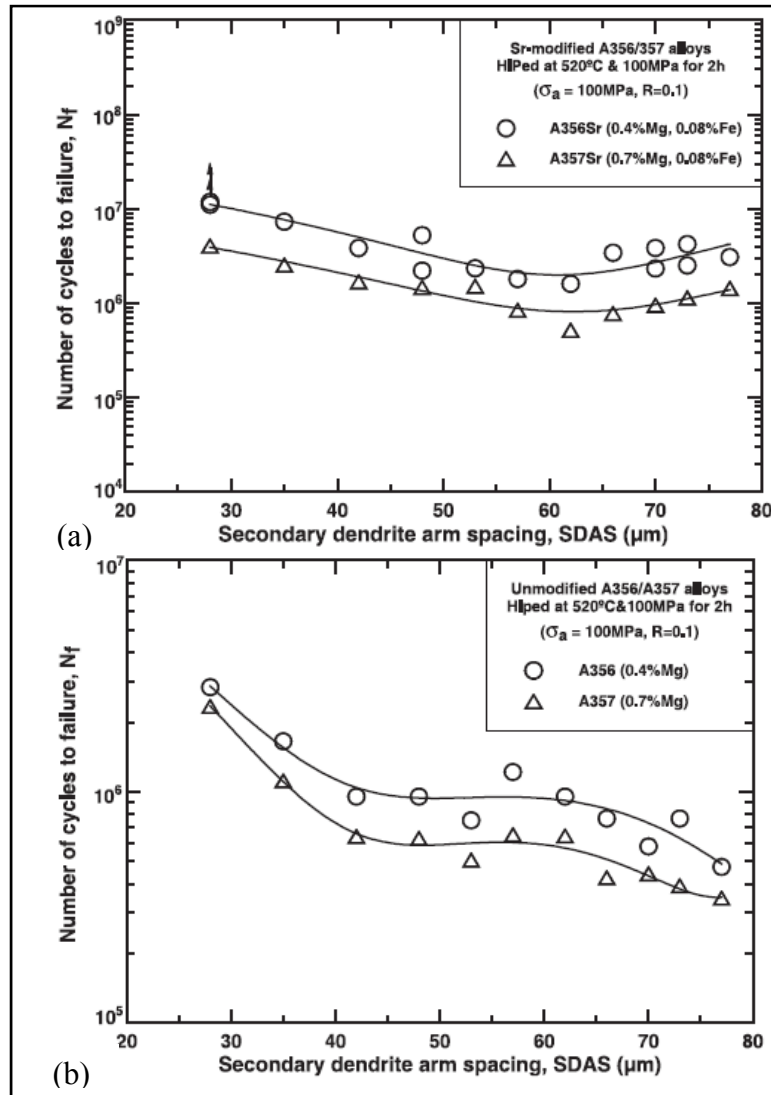


Figure 1.17 Durée de vie pour un alliage A356 modifié (a) ou non modifié (b) en fonction du SDAS.  
Tirées de Wang, Apelian et Lados (2001b)

### 1.3.2 Phénomène de fluage

Le fluage est un phénomène d'endommagement mis en évidence au début du XX<sup>ème</sup> siècle par les travaux Philips puis Andrade (1905 et 1910-1914). À contrainte constante et pour une température donnée, la déformation augmente progressivement au cours du temps et de façon plastique pour aller jusqu'à la rupture. Plus la température est élevée, plus le phénomène est amplifié. Pour les métaux, le fluage est considéré comme important si la température d'essai

est supérieure à 0,4 fois la température de fusion (Saint-Antonin, 1999). Dans le cas de l'A356, la température de fusion est de 655 °C donc le fluage est important dès 260 °C.

Trois stades sont généralement distingués pour un essai de fluage (Figure 1.18) : après la mise à contrainte constante du matériau, une première augmentation de la déformation est observée. C'est le fluage primaire. S'en suit un stade où la déformation n'évolue presque pas. Cette phase est appelée fluage secondaire. Enfin, une troisième phase, appelée fluage tertiaire, est observée durant laquelle la déformation augmente rapidement pour aller jusqu'à la rupture.

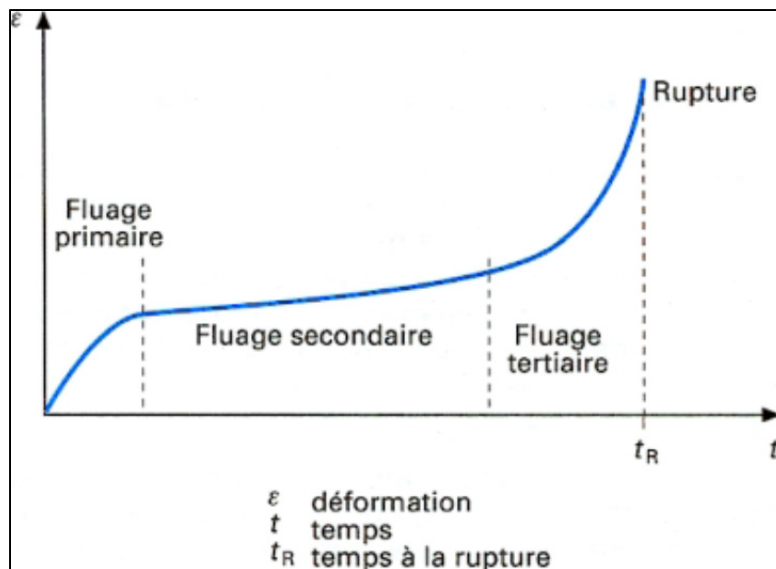


Figure 1.18 Courbe de fluage. Tirée de Saint-Antonin (1999)

En d'autres termes, le fluage primaire correspond à une diminution de la vitesse de déformation, traduction d'une augmentation de la résistance du matériau. Le stade de fluage secondaire correspond lui à la période où la vitesse de déformation est constante tandis que le fluage tertiaire voit la vitesse de déformation augmenter jusqu'à la rupture.

### 1.3.2.1 Mécanismes de fluage

Deux types principaux de mécanismes de fluages existent : le fluage par diffusion et le fluage par dislocations. Le fluage par diffusion intervient à plus haute température que le fluage par dislocations.

Pour le fluage par dislocations, les déformations sont dues aux glissements de dislocations. Lors du fluage primaire, des dislocations sont créées et se propagent dans le matériau. L'augmentation du nombre de dislocations entraîne la réduction de leur mobilité et par suite la réduction de la vitesse de déformation. Le fluage secondaire correspond alors à l'organisation des dislocations pour former une structure cellulaire : c'est la polygonisation du glissement. Pendant cette phase, la densité de dislocation reste stable car il y a équilibre entre formation et disparition des dislocations. Lors du fluage tertiaire, des cavités puis des fissures apparaissent dans le matériau, notamment aux joints de grain et entraînent la rupture via l'augmentation locale de la contrainte. En effet, les cavités naissent et grossissent jusqu'à fusionner entre elles (coalescence) pour créer des fissures. Ces dernières se propagent dans le matériau jusqu'à entraîner la rupture (Saint-Antonin, 1999).

Lors du fluage par diffusion, la déformation est le résultat de la diffusion des atomes et des lacunes le long des joints de grain ou dans les grains. Dans le premier cas, on parle de fluage intergranulaire ou fluage de Coble alors que dans le deuxième cas le fluage est dit transgranulaire ou fluage de Herring-Nabarro (Nabarro, 2006). La vitesse de fluage transgranulaire est d'autant plus rapide que les grains sont petits. En effet entre deux grains on rencontre de nombreux atomes interstitiels ainsi que des lacunes, éléments à l'origine du fluage par diffusion (Saint-Antonin, 1999).

### 1.3.2.2 Réduction de la vitesse de fluage

Les précipités et le renforcement des joints de grains par des composés intermétalliques permettent d'augmenter la résistance au fluage des alliages. En effet, les composés et précipités sont des obstacles à la propagation des dislocations (Figure 1.19).

Dans le cas de l'alliage A356, des précipités de magnésium ou des dispersoïdes de nickel sont utilisés pour réduire la vitesse de fluage (Farkoosh et al., 2013). Cependant, si la résistance au fluage est améliorée, le module d'élasticité est plus faible de 20 % en présence de magnésium dans l'alliage. L'ajout de nickel entraîne une baisse de la ductilité de l'alliage (Farkoosh et Pekguleryuz, 2013).

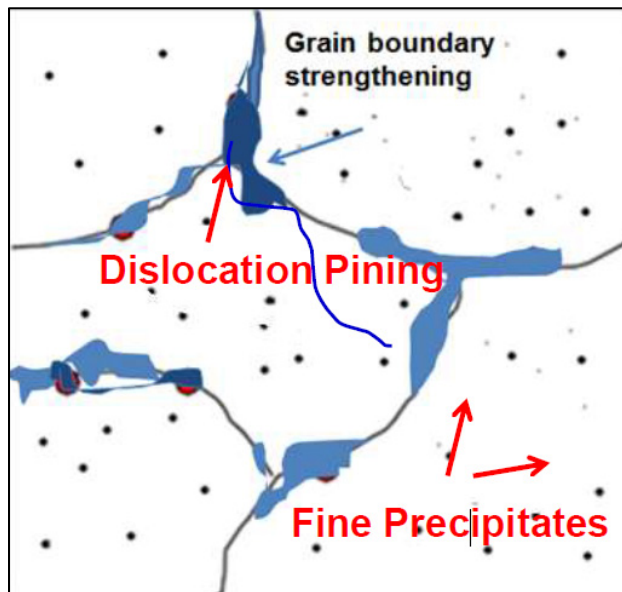


Figure 1.19 Principe d'augmentation de la résistance au fluage des alliages. Tiré de Farkoosh, Chen et Pekguleryuz (2013)

### 1.3.3 Ajout de cuivre et de molybdène dans l'alliage A356

Plus récemment, de nouveaux ajouts ont été suggérés pour l'utilisation de l'alliage A356 pour les culasses de moteur diesel (Garat, 2007). Les travaux réalisés par Garat préconisent l'utilisation d'un alliage résistant en fatigue et d'ajouter des éléments permettant soit d'augmenter la ductilité de l'alliage, soit d'augmenter la résistance au fluage à 300 °C. Dans cette optique, il est proposé d'ajouter du cuivre ou du molybdène à l'alliage pour augmenter sa résistance mécanique et sa résistance au fluage.

### 1.3.3.1 Ajout de cuivre

Une solution proposée est d'ajouter 0,5 % de cuivre (Garat, 2007) à l'alliage A356 (Tableau 1.4) : jusqu'à 250 °C, les contraintes d'écoulement et limite à rupture sont plus importantes que pour l'A356 sans ajout mais elles sont les mêmes à 300 °C car la phase Al-Si-Cu-Mg responsable du durcissement structural est dissoute à cette température (Garat, 2007).

Tableau 1.4 Effet de l'ajout de cuivre sur les contraintes d'écoulement et contraintes à rupture. Tirées de Garat (2007)

Alliage	20 °C		250 °C		300 °C	
	$\sigma_{y0,2\%}$ (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)	$\sigma_{y0,2\%}$ (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)	$\sigma_{y0,2\%}$ (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)
<b>A356</b>	257	299	55	61	40	43
<b>A356+0,5 Cu</b>	275	327	66	73	40	44

### 1.3.3.2 Ajout de molybdène

Pour augmenter la résistance au fluage à haute température sans modifier la ductilité de l'alliage, l'introduction de dispersoïdes stables thermiquement est proposée par Farkoosh (Farkoosh, Grant Chen et Pekguleryuz, 2014). Pour les alliages corroyés, le scandium, le zirconium et le chrome sont de bons candidats pour former des dispersoïdes mais pour les alliages de fonderie au silicium, leur effet est négligeable (Farkoosh, Grant Chen et Pekguleryuz, 2014). Le molybdène est un élément qui peut former des dispersoïdes stables dans les alliages Al-Si car il diffuse très peu. L'utilisation du molybdène pour augmenter la résistance mécanique de l'alliage a été discutée au paragraphe 1.2.4.2. Il a été montré (Farkoosh, Grant Chen et Pekguleryuz, 2014) qu'avec la présence de molybdène dans l'alliage, les propriétés en fluage de l'alliage augmentent : la vitesse de déformation lors du stade II du fluage est beaucoup plus faible et le temps à rupture est plus important (Figure 1.20).

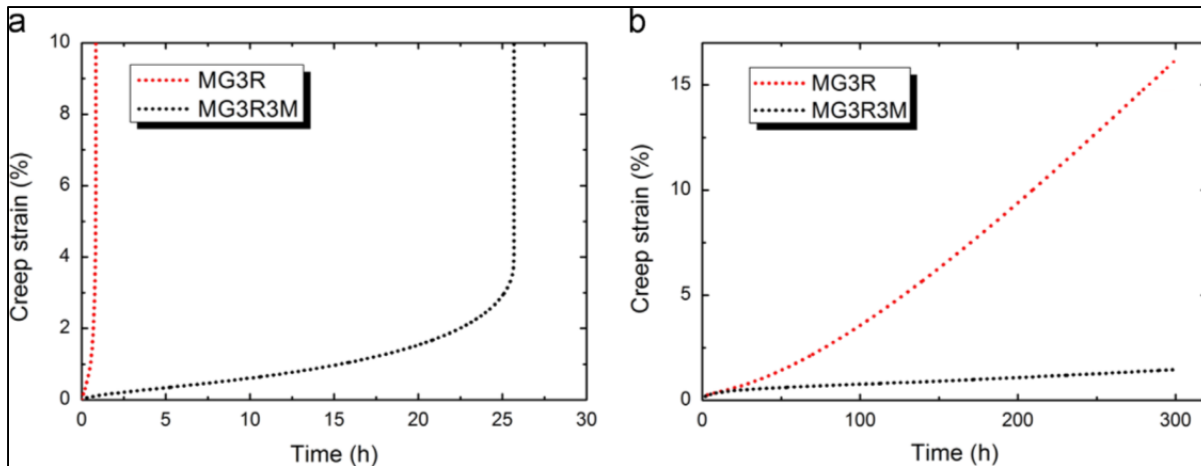


Figure 1.20 Comparaison du comportement en fluage en traction (a) et compression (b) pour l'alliage A356, modifié au molybdène (MG3R3M) ou non (MG3R). Tirée de Farkoosh, Grant Chen et Pekguleryuz (2014)

Si l'ajout de molybdène dans l'alliage A356 permet d'obtenir une meilleure résistance au fluage, l'effet du molybdène sur la fatigue n'a pas été étudié.

### 1.3.4 Interaction fatigue-fluage

Jusqu'à présent, les phénomènes de fatigue et de fluage ainsi que leurs effets sur la microstructure ont été présentés séparément. Mais dans le cas des culasses de moteur diesel, l'alliage A356 subit simultanément de la fatigue et du fluage. La littérature ne présente que peu de travaux ayant parlé de l'interaction entre la fatigue et le fluage (Garat, 2007), et l'effet sur la microstructure n'est pas expliqué, ce qui amène aux questions suivantes :

- Est-ce que solliciter l'alliage en fatigue puis en fluage revient à solliciter l'alliage en fatigue avec un temps de maintien?
- Est-ce que faire des tests en fatigue suivis d'un maintien à 300 °C revient à faire de la fatigue à 300 °C?



#### **1.4 Bilan de cette revue et objectif de l'étude**

Dans cette revue de littérature, les propriétés physiques et mécaniques de l'alliage A356 ont été présentées ainsi que sa microstructure. Les phénomènes de fatigue et fluage ont été présentés et il a été discuté des variantes de composition de l'alliage A356 pouvant améliorer les résistances en fatigue et en fluage. Une attention particulière a été donnée à l'effet de l'ajout du molybdène sur les propriétés en fluage : cette addition permet d'avoir des dispersoïdes qui ne se dissolvent pas dans l'alliage à 300 °C. Par contre, l'interaction entre fatigue et fluage pour les matériaux n'est que peu développée dans la littérature. Si les sollicitations mécaniques sont connues, il n'y a que peu d'informations sur les effets pour les microstructures.

L'étude faite ici sur les culasses de moteur diesel mettra l'accent sur la reproduction des cycles thermiques et mécaniques subie par ces dernières pour connaître l'évolution réelle de la microstructure lorsque fatigue et fluage sont combinés et que l'exposition à haute température est fractionnée. Pour ce faire, un banc d'essai sera créé. Ce banc d'essai devra être conçu pour faire subir des cycles thermiques et mécaniques aux éprouvettes avec un maintien à haute température pour permettre le fluage. L'effet du molybdène sera analysé afin de confirmer si cet ajout est bénéfique pour les culasses ou non, le but, à terme, étant d'avoir le matériau le plus résistant pour ces pièces.



## CHAPITRE 2

### DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE

#### 2.1 Objectifs des tests

Le but du projet est de créer un banc d'essai pour tester de façon simple la résistance des culasses en alliage d'aluminium. On souhaite étudier ce qui se passe vraiment dans les culasses, notamment en respectant la géométrie de la pièce et les variations de température subies par celle-ci pour connaître la réponse de l'alliage A356 dans cette configuration.

Comme expliqué dans le CHAPITRE 1, des fissures apparaissent sur les culasses au niveau du pontet inter-soupape. La géométrie des éprouvettes devra donc reprendre les caractéristiques de cette partie de la culasse. De plus, les variations de température subies par les culasses sont liées au cycle start/stop des moteurs diesel : la pièce initialement à température ambiante, est chauffée jusqu'à 300 °C pour une durée dépendant de l'utilisation du véhicule puis est refroidie. Du fait de ces variations thermiques, des variations de chargements ont lieu : le pontet est en compression plastique à chaud et se retrouve en tension lors des refroidissements. Afin de reproduire au mieux les cycles thermiques et mécaniques, les éprouvettes devront être chauffées jusqu'à 300 °C tout en étant comprimées. Pour ce faire, il est nécessaire que les éprouvettes soient encastrées dans un cadre rigide et que la température soit bien contrôlée pour pouvoir effectuer un maintien à chaud. Le minimum de température est choisi de façon plus arbitraire. En effet, la notion de température ambiante étant différente en fonction des saisons et des lieux, il est décidé de prendre 50 °C, ce qui permettra de gagner du temps lors des essais.

La conception du banc d'essai est donc articulée autour de la géométrie des éprouvettes ainsi que de l'intégration d'éléments permettant d'atteindre les températures choisies. De plus, il est décidé de suivre le déplacement en surface des éprouvettes par caméra pour ensuite appliquer la technique de corrélation d'images pour connaître les déformations. Il est donc nécessaire de laisser une face visible et non encombrée.

## **2.2 Choix des éléments constituant le banc d'essai**

Pour créer le banc d'essai, des critères de simplicité, maniabilité et adaptabilité pour les différents éléments sont à respecter. La conception s'articule autour des éprouvettes dont la géométrie doit reprendre la forme du pontet inter-soupape des culasses. Le cadre, les éléments de chauffage et ceux de refroidissement doivent pouvoir s'adapter aux éprouvettes.

### **2.2.1 Éprouvettes**

Les éprouvettes représentent la partie où les fissures sont observées sur les culasses, c'est-à-dire le pontet inter-soupape.

#### **2.2.1.1 Géométrie**

La géométrie est issue de culasses réelles : des mesures sont effectuées sur plusieurs moteurs des laboratoires de l'ÉTS. Les dimensions des pontets inter-soupapes ainsi que des diamètres des admissions/échappements sont relevées. Seulement, chaque culasse a ses propres dimensions. Les diamètres ne sont pas normalisés et les pontets non plus. Les dimensions choisies sont alors celles mesurées sur le moteur présenté en Figure 2.1.



Figure 2.1 Culasse de moteur diesel (en fonte)  
utilisée pour les dimensions

Sur cette culasse, les dimensions suivantes ont été mesurées (Tableau 2.1):

Tableau 2.1 Dimensions mesurées

<b>Diamètre cylindre (mm)</b>	82,8
<b>Diamètre bougie (mm)</b>	33,9
<b>Espace entre cylindre (mm)</b>	7,0
<b>Espace entre les bougies (mm)</b>	11,0

Ces dimensions sont reprises pour modéliser à l'aide du logiciel CATIA les éprouvettes représentant la zone de pontet inter-soupape des culasses (Figure 2.2).

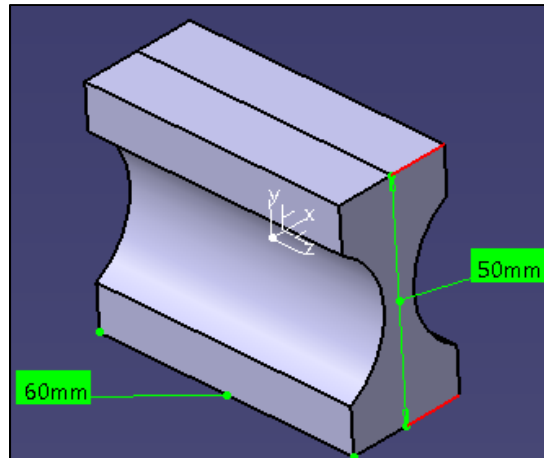


Figure 2.2 Modélisation des éprouvettes, géométrie retenue

Au final, les éprouvettes ont les dimensions suivantes (Tableau 2.2) :

Tableau 2.2 Dimensions des éprouvettes choisies

<b>Hauteur (mm)</b>	50,0
<b>Longueur (mm)</b>	25,0
<b>Profondeur (mm)</b>	60,0
<b>Diamètre (mm)</b>	33,9

Six perçages sont ajoutés dans le sens de la longueur : cela permet de réduire la masse de l'éprouvette puis cela ajoute des possibilités pour le chauffage ou le refroidissement de l'éprouvette (Figure 2.3). Le plan des éprouvettes donné à l'usinage est en ANNEXE I.

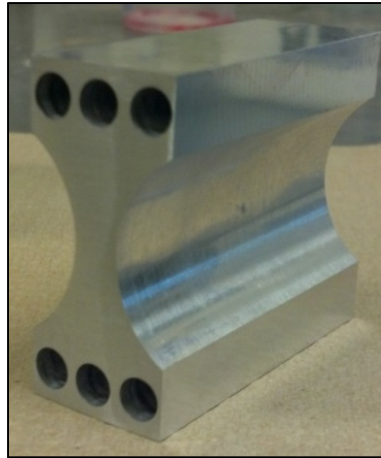


Figure 2.3 Éprouvette en sortie d'usinage

### 2.2.1.2 Matériau

L'alliage utilisé est l'alliage A356. Cet alliage est utilisé dans les véhicules automobiles sous la forme modifiée (avec ajout de strontium) comme discuté au chapitre 1.2.2.2. Pour ces essais, on travaille à la fois sur la forme modifiée et non modifiée ainsi que sur l'effet de l'ajout de molybdène. Les compositions utilisées sont les suivantes (compositions données en pourcentage d'éléments) :

- A356+0,5Cu (non modifié);
- A356+0,5Cu+0,15Mo (non modifié);
- A356+0,5Cu+150ppm Sr (modifié);
- A356+0,5Cu+0,15Mo+150ppm Sr (modifié).

### 2.2.1.3 Fabrication des éprouvettes

Les éprouvettes sont obtenues après usinage de plaques de 4x5x1 po ou 10,16x12,7x2,54 cm obtenues par fonderie à l'université McGill. Les plaques sont coulées dans un moule permanent à partir d'un alliage chauffé à 750 °C dans un creuset Carbone-Silicium. Les différents alliages sont obtenus à partir d'alliage A356 commercial et d'alliages mère Al-

Mo (9,5 %) avec un taux de recouvrement de 88 %, Al-Cu (33 %) avec un taux de recouvrement de 85 % et Al-Sr (10 %) avec un taux de recouvrement de 90 %. Le taux de recouvrement est un facteur expérimental qui exprime la capacité de l'alliage mère à se mélanger correctement avec l'alliage commercial. Le mélange est assuré grâce au chauffage par induction du creuset : le champ magnétique crée par l'induction met en mouvement le métal (Figure 2.4).



Figure 2.4 Creuset pour préparation de l'alliage

Une fois les différents éléments dissous et mélangés, la plaque est coulée dans un moule préalablement préchauffé dans un four (Figure 2.5).





Figure 2.5 Coulée de l'alliage

L'alliage solidifie rapidement dans le moule que l'on peut alors ouvrir pour extraire la plaque. Cette dernière refroidit à l'air (Figure 2.6).

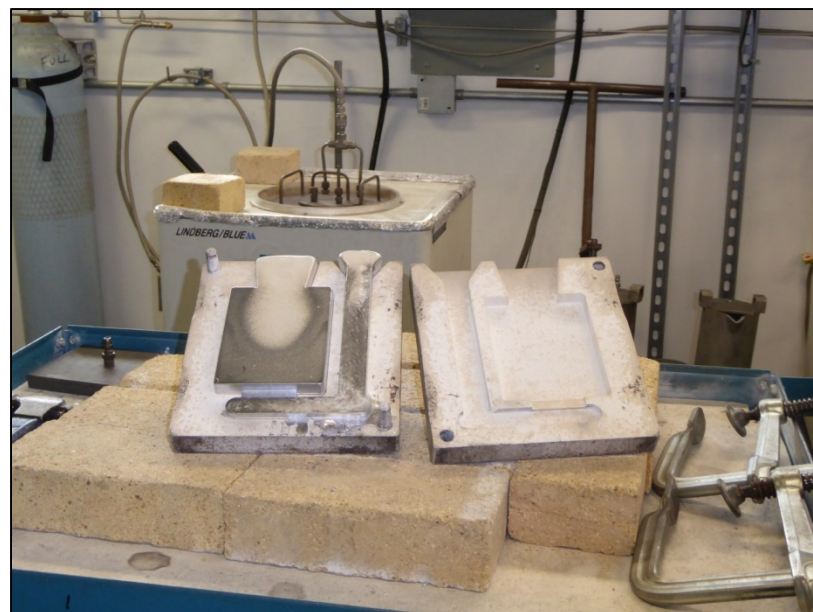


Figure 2.6 Plaque obtenue après coulée

Au total, cinq plaques sont coulées pour ce projet. À partir de chacune d'elles, deux éprouvettes au maximum sont usinées (ANNEXE I). Au final, nous avons à disposition neuf éprouvettes, réparties comme suit entre les compositions (Tableau 2.3) :

Tableau 2.3 Composition des éprouvettes disponibles pour le projet

	<b>Lot1: A356 non modifié</b>		<b>Lot 2 : A356 modifié au Strontium</b>	
<b>A356+0,5Cu+0,15Mo</b>	2 éprouvettes	N°4	2 éprouvettes	N°1 vieillie au four 100 h à 300 °C
		N°6		N°2
<b>A356+0,5Cu</b>	3 éprouvettes	N°7	2 éprouvettes	N°3 vieillie au four 100 h à 300 °C
		N°8		N°5
		N°9		

La composition exacte des plaques obtenues est donnée en ANNEXE II. Deux éprouvettes sont vieilles au four pendant cent heures à 300 °C. Les autres ne subissent aucun traitement thermique. Les microstructures des alliages avec et sans molybdène sont présentées sur la Figure 2.7.

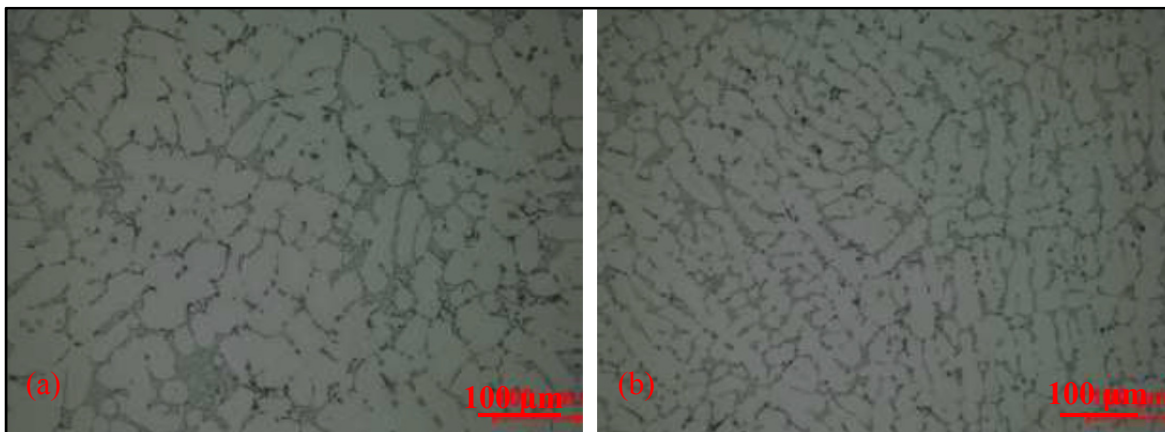


Figure 2.7 Microstructure des alliages obtenus : A356+0,5Cu (a), et A356+0,5Cu+0,15Mo (b). Tirées de Ezan (2014)

La microstructure est plus raffinée lorsque l'alliage comporte du molybdène. L'effet du strontium n'est pas présenté ici mais a été discuté dans le chapitre I. Le vieillissement au four pendant 100 heures à 300 °C est repris des travaux de l'université McGill sur l'effet du molybdène sur les propriétés en fluage (Farkoosh, Grant Chen et Pekguleryuz, 2014). Ce traitement a pour but d'homogénéiser les dispersions de résistance mécanique dans les alliages.

## **2.2.2 Cadre**

Le cadre a pour but de tenir encastrées les éprouvettes tout en intégrant les éléments chauffants. L'encastrement est nécessaire pour obtenir de la compression à chaud. Le cadre doit être facile à manipuler pour que le changement d'éprouvette soit le plus facile possible et il doit pouvoir supporter les variations de température.

### **2.2.2.1 Solution retenue**

On décide de faire le cadre en deux parties, que l'on viendra serrer sur l'éprouvette (Figure 2.8). La hauteur de chaque partie correspond à celle de l'éprouvette. Le contact éprouvette/cadre est assuré via des vis pour la hauteur et des tiges filetées pour la largeur. L'usage de rondelles bellevilles permet de gérer le serrage. Enfin, il est choisi d'ajouter les parties non utiles du cadre afin d'avoir un contrôle visuel le plus grand possible sur le montage en tout temps. Sa forme est simple et facile à manipuler. De plus, il permet de tester des éprouvettes avec des largeurs différentes.

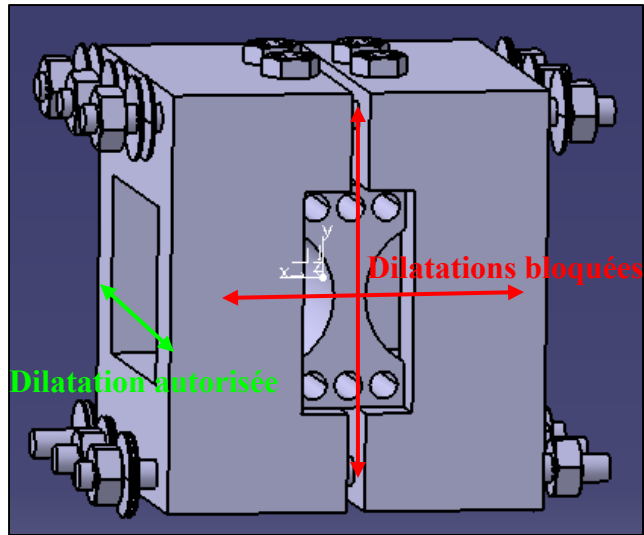


Figure 2.8 Montage expérimental sous CATIA

Tableau 2.4 Dimensions globales du montage

<b>Hauteur (mm)</b>	94
<b>Longueur (mm)</b>	85
<b>Profondeur (mm)</b>	80

Les dimensions globales du montage sont données dans le Tableau 2.4. Les faces des éprouvettes ne sont pas encombrées par des éléments de cadre, ce qui laisse la possibilité de suivre le déplacement par caméra pour faire de la corrélation d'images et les dilatations sont bloquées dans deux des trois directions possibles du fait des contacts entre le cadre et l'éprouvette sur des surfaces entières.

#### 2.2.2.2 Matériau et fabrication

Le cadre est fabriqué en acier car ce matériau se dilate moins que l'aluminium. Un acier standard permet de réduire les coûts du montage. L'acier AISi 1020 est alors choisi, acier standard à faible coût. Il n'est pas nécessaire d'avoir un acier haute résistance pour l'usage que l'on en fait. En effet, 300 °C n'est pas une température élevée pour l'acier, le cadre

devrait donc ne pas subir de modifications notables pendant les tests. Le cadre est usiné directement à partir d'un bloc d'acier (Figure 2.9). Pour la visserie, les éléments choisis sont des éléments à haute résistance afin qu'ils ne soient pas endommagés par les variations de température.



Figure 2.9 Pièce utilisée pour le cadre

## 2.2.3 Solution de chauffage et de refroidissement

### 2.2.3.1 Chauffage

Pour le chauffage, la première idée est d'utiliser des éléments fabriqués par Volton, entreprise montréalaise, se plaçant dans les cavités. Les éléments sont conçus sur mesure pour venir épouser les cavités des éprouvettes. Un élément est placé de chaque côté de l'éprouvette pour avoir un chauffage uniforme. A cela, s'ajoutent deux plaques en acier pour venir serrer les éléments à l'éprouvette. Les éléments délivrent chacun une puissance de 120 Watts et sont alimentés par une tension de 120 Volts (Figure 2.10). Avec ces éléments, la température de 300 °C est atteinte en 4 minutes.



Figure 2.10 Montage des éléments chauffants

Seulement, ces éléments s'avèrent fragiles (Figure 2.11) : après chauffage, le mica enveloppant les fils conduisant le courant s'effrite jusqu'à se désolidariser totalement laissant l'élément s'ouvrir en deux parties et le rendant hors d'usage.

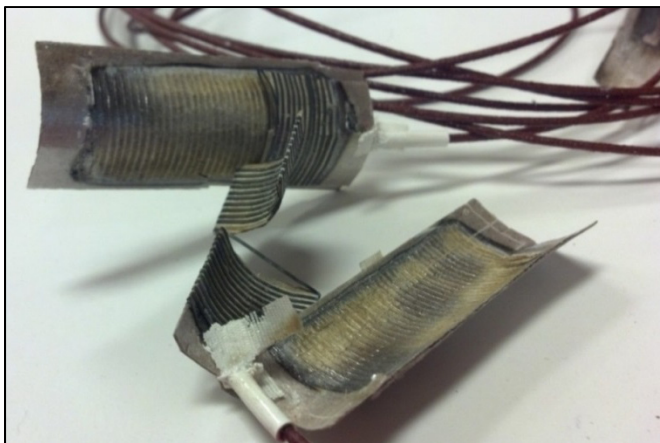


Figure 2.11 Élément chauffant brisé

Les éléments sont donc remplacés par des cartouches chauffantes de la marque Omega (Figure 2.12). Les cartouches sont en chrome et peuvent supporter une température 650 °C.





Figure 2.12 Cartouche chauffante

Tableau 2.5 Caractéristiques des cartouches chauffantes

Matériau	Longueur (cm)	Puissance (W)
Chrome	10,15	300

Les cartouches ayant une puissance de 300 Watts chaque (Tableau 2.5), on choisit d'en utiliser quatre, de façon à avoir une chauffe relativement rapide et uniforme avec des sources de chaleur qui sont réparties symétriquement sur l'éprouvette (Figure 2.13).

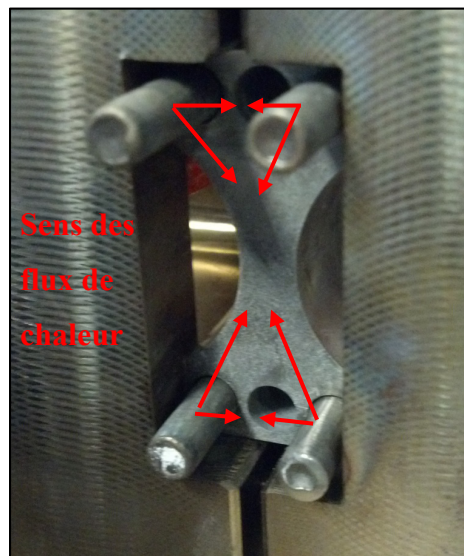


Figure 2.13 Positionnement des cartouches chauffantes et flux de chaleur

Le changement de système de chauffage entraîne un changement de concept : les sources de chaleur ne sont plus réparties conformément avec ce qui se passe dans un moteur diesel. En effet, le chauffage ne provient plus des parties courbées représentant les conduits d'air chaud mais il provient de l'éprouvette directement.

### 2.2.3.2 Refroidissement

Pour accélérer le retour à température ambiante des éprouvettes, un système de refroidissement à air est mis en place. Un refroidissement à eau serait plus rapide mais les éléments chauffants sont sensibles à l'humidité. Un système à air est un bon compromis entre efficacité et simplicité d'installation.

Des buses plates sont utilisées pour conduire l'air comprimé envoyé sur le montage. Ces buses sont orientées vers les cavités de l'éprouvette. Le temps de refroidissement est de l'ordre de 15 minutes pour refroidir l'éprouvette de 300 °C à 50 °C. Un ventilateur est aussi disposé proche du montage, pour dissiper la chaleur émise par les cartouches chauffantes. Ce ventilateur permet de limiter la présence d'air chaud au niveau de l'éprouvette lors de l'utilisation de la caméra (Figure 2.14).

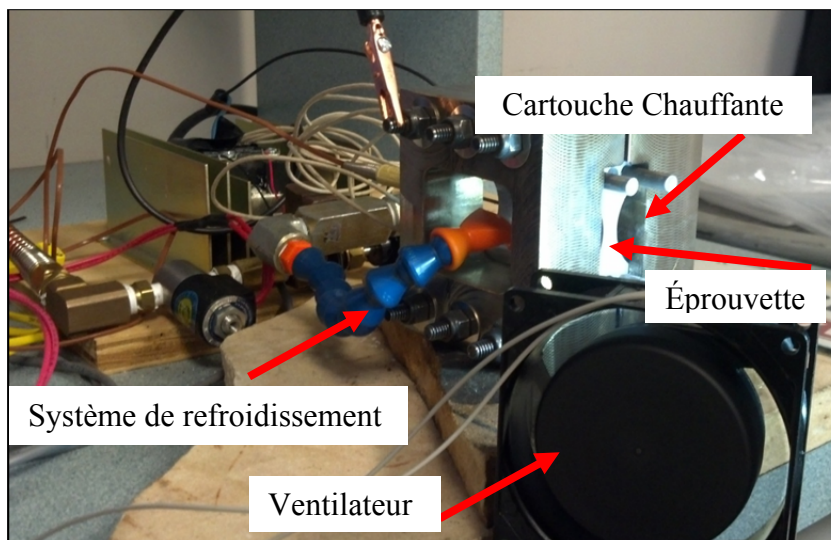


Figure 2.14 Positionnement des différents éléments du montage



Avec ce système de refroidissement, les éprouvettes ne sont pas refroidies uniformément : le centre est refroidi en premier alors que les parties hautes et basses ne le sont qu'ensuite, par homogénéisation de la température dans la pièce (Figure 2.15).

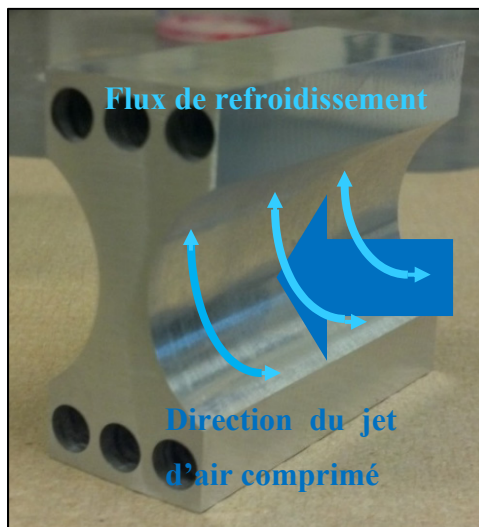


Figure 2.15 Flux de refroidissement

### 2.2.3.3 Maintien de la température maximale

Les cycles thermiques start/stop des moteurs diesel comportent une phase de maintien de la température à 300 °C, phase correspondant à la période d'utilisation du véhicule. Dans ce projet, plusieurs temps de maintien seront envisagés pour chaque cycle : 30 secondes, 2 minutes ou 8 minutes. Il est donc nécessaire de pouvoir moduler la puissance des éléments chauffants sur une période donnée afin de pouvoir maintenir une température constante dans l'éprouvette.

### 2.2.3.4 Contrôle du chauffage et du refroidissement

L'ensemble du montage est géré par un programme LabView qui contrôle le chauffage et le refroidissement (ANNEXE III). Le chauffage et refroidissement sont contrôlés par un système « tout ou rien ». On choisit les températures maximales et minimales que l'on veut

atteindre pour chaque cycle, le temps de maintien à la température maximale ainsi que le nombre de cycles désirés. Les données de température sont enregistrées à chaque seconde pour pouvoir identifier chaque cycle.

Un thermocouple de type K est placé au centre d'une face de l'éprouvette testée via un perçage afin de connaître la température en tout temps (Figure 2.16). Le thermocouple est branché sur la carte d'acquisition et la température est traitée dans le programme LabView. Le contrôle de la température est assuré via une boucle de rétroaction consigne/ température lue. Le programme LabView permet d'appliquer le cycle de température voulu à l'éprouvette, avec un temps de 0,05 secondes entre chaque consigne.

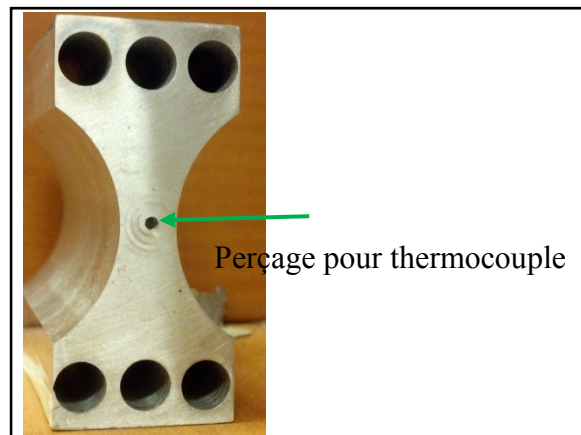


Figure 2.16 Emplacement du thermocouple

#### 2.2.4 Suivi du déplacement et obtention des déformations

Pour connaître la déformation présente dans les éprouvettes au cours des tests, la technique de corrélation d'images est mise en place. Cette technique ne peut s'utiliser que pour avoir des déformations en surface. Dans cette étude, la face étudiée est la face opposée au thermocouple. Le but est d'obtenir les déformations ayant lieu lors des cycles thermiques au centre de la face, dans la direction longitudinale (sur la Figure 2.17, direction X).

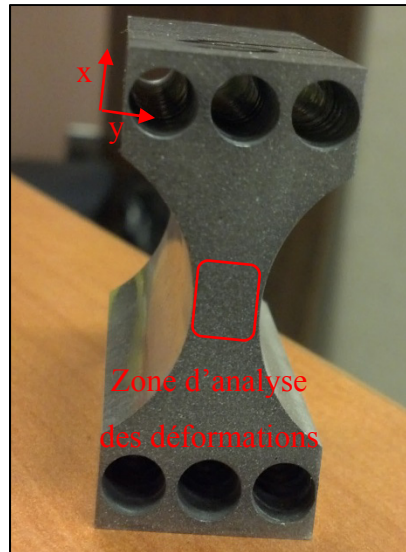


Figure 2.17 Localisation de l'analyse des déformations

La technique de corrélation d'images consiste à suivre le déplacement d'une surface via une prise d'images. Ces images sont ensuite traitées par un logiciel d'analyse d'images, ici OpenDic, qui donne les champs de déplacements. Les résultats sont ensuite traités dans Matlab via deux programmes d'éléments finis. Les champs des déformations sont finalement obtenus (Figure 2.18). Pour les visualiser, le logiciel Fiji/ImageJ est utilisé.

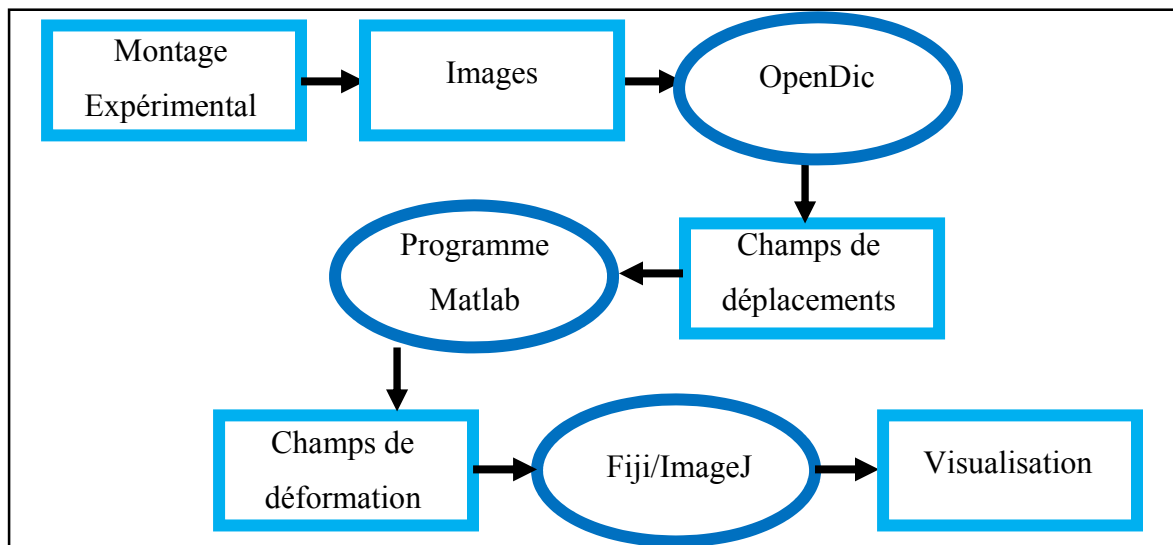


Figure 2.18 Fonctionnement de la corrélation d'images

### 2.2.4.1 Obtention des images

Pour que la technique de corrélation d'images fonctionne, il est nécessaire que la surface prise en photo présente beaucoup de détails. Dans notre cas, les détails sont créés artificiellement en recouvrant la surface d'un mouchetis noir et blanc. Pour cela, un aérographe est utilisé pour appliquer une fine pellicule de peinture blanche sur la surface. Une fois cette couche sèche, une couche de peinture noire est appliquée, toujours avec l'aérographe.

La prise d'images s'effectue ensuite à l'aide d'une caméra installée sur trépied face au montage (Figure 2.19). Cette caméra permet de prendre des images en noir et blanc et est contrôlée via un programme LabView, enregistrant la date de prise de vue ainsi que le numéro d'image correspondant. Une fois la caméra installée à bonne hauteur et perpendiculairement à la surface suivie, la mise au point peut être faite sur le mouchetis. Il est important de régler également le temps d'exposition, de façon à avoir le meilleur contraste possible pour les images.



Figure 2.19 Suivi de la déformation par caméra

Il est possible de couper les images avant la prise de vue, ou de les garder telles quelles, en 2056x2452 pixels. Dans notre cas, elles sont gardées entières et seront réduites au besoin plus tard dans l'analyse. Dans le programme LabView contrôlant la caméra, il faut régler l'intervalle de temps voulu entre deux images. Pour notre étude, cet intervalle sera de 40 secondes ou de 5 secondes, dépendamment du test fait. Une fois ces réglages effectués, le programme peut être exécuté, les images seront automatiquement enregistrées. Ces dernières sont ensuite traitées avec le logiciel OpenDic pour obtenir les champs de déplacement.

#### 2.2.4.2 Corrélation d'images sous OpenDic

Le logiciel OpenDic propose d'analyser les déplacements entre une image initiale et une série d'images (Figure 2.20). La première étape consiste à sélectionner les images que l'on veut analyser. Le calcul est long donc il faut limiter le nombre d'images analysées pour chaque test.

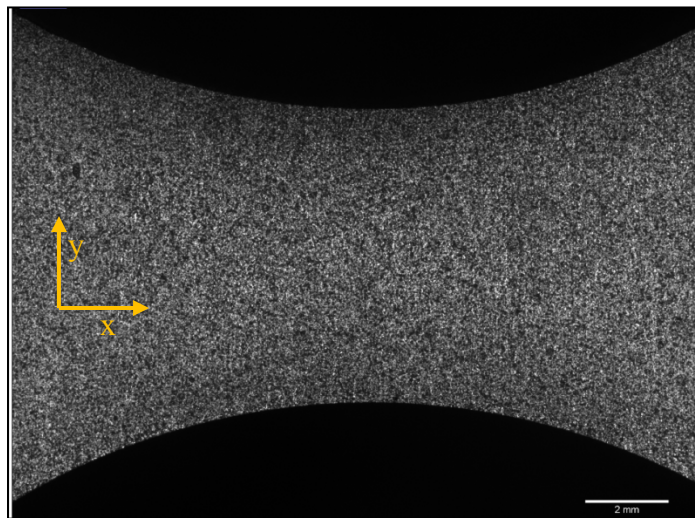


Figure 2.20 Image prise avec la caméra

Une fois les images sélectionnées, on recherche le déplacement de corps rigide qui a pu se produire pendant le test. Vu que les tests peuvent durer une semaine ou plus, il est parfois nécessaire de translater des images manuellement car la caméra a pu bouger. Une fois les images recalées, le logiciel OpenDic peut être lancé.

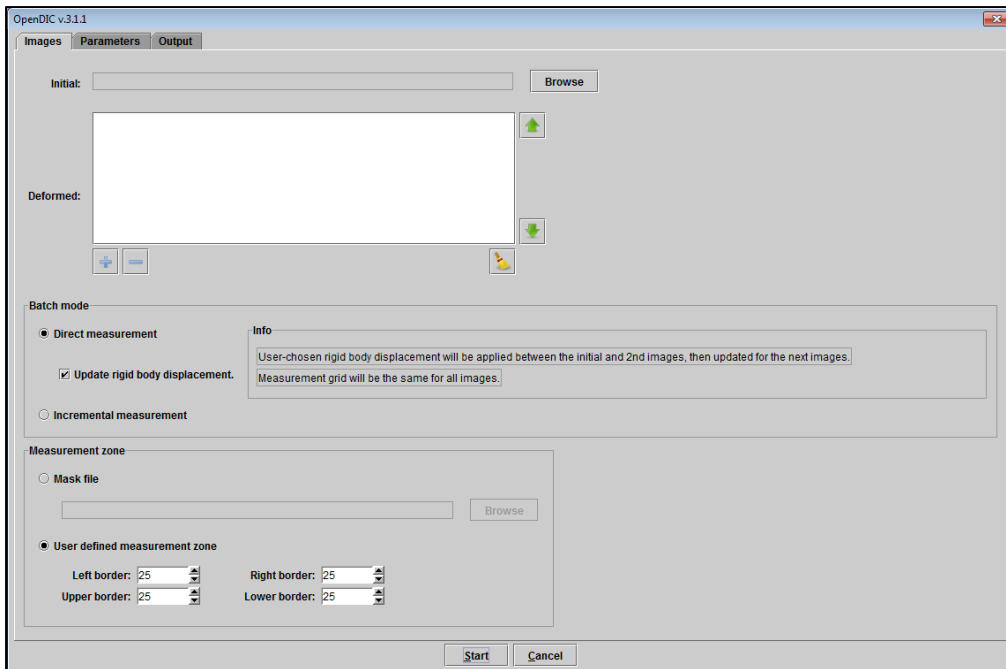


Figure 2.21 Onglet « images » du logiciel OpenDic

En lançant le logiciel, on arrive sur une interface à trois onglets. Le premier concerne le choix des images, le deuxième le choix des paramètres et le troisième les options d'enregistrement des données.

Dans le premier onglet (Figure 2.21), on définit l'image initiale ainsi que la liste des images à analyser. On peut aussi choisir d'appliquer un masque aux images : cela permet de réduire la zone à analyser et ainsi de gagner du temps lors des calculs. Il est possible de définir un masque rectangulaire en donnant ses dimensions ou alors on applique un masque de forme plus complexe en important un fichier noir et blanc. Dans notre cas, un masque de forme complexe est appliqué (Figure 2.22), ce qui permet d'analyser seulement le centre de la face de l'éprouvette. De cette façon, les bords de l'éprouvette sont exclus de l'analyse, zones susceptibles de donner des erreurs. L'intérêt est aussi de réduire le temps de calcul en travaillant sur une plus petite surface.

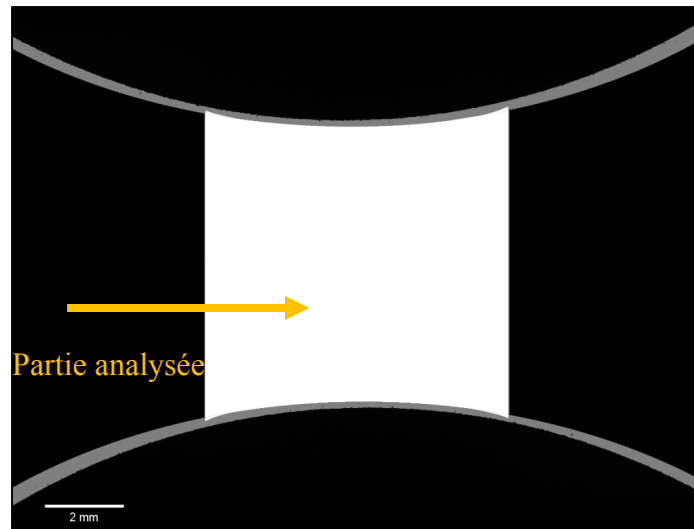


Figure 2.22 Masque utilisé pour l'analyse sous OpenDIC

Le masque et les images importées dans le logiciel, il faut spécifier les paramètres d'analyse (Figure 2.23). Ces paramètres sont les mêmes pour toutes les analyses effectuées à l'exception du déplacement de corps rigide qui est évalué sur chaque série d'images. L'analyse se fait en deux étapes : une première étape d'estimation a lieu pour chaque image, suivie de l'étape de calcul. La zone de recherche pour l'estimation est espacée et peu dense. Elle est délimitée par les paramètres « estimation grid ». La grille de mesure est plus précise et délimitée par « measurement grid ». L'incertitude sur le déplacement est mise à 25 pixels pour pouvoir compenser les éventuels déplacements non corrigés manuellement au préalable. L'interpolation est mise à 25 soit 1/25 de pixels de précision, compromis entre précision et rapidité du calcul. Enfin, il est choisi de garder tous les points quel que soit le coefficient de corrélation trouvé, et de modifier à l'étape suivante au besoin. De cette façon aucune information n'est perdue dans la première étape du traitement des images pour obtenir les déformations.

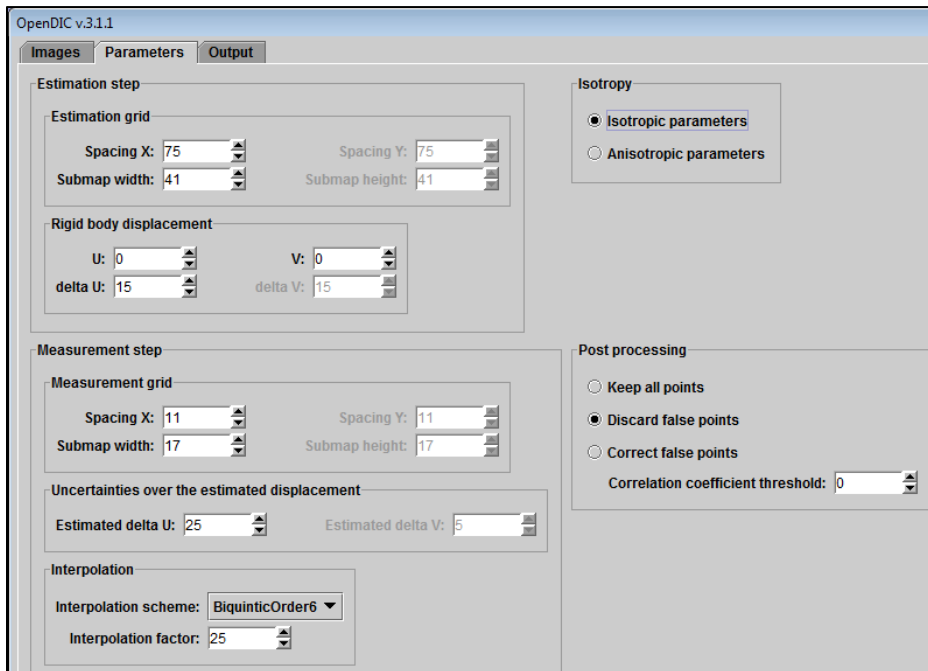


Figure 2.23 Onglet « parameters » du logiciel OpenDic

La préparation de l'analyse se termine par le choix de l'emplacement d'enregistrements des fichiers résultats. Le calcul est alors prêt à être lancé. Ce dernier prend environ une journée complète pour deux cents images.

### 2.2.4.3 Obtention des déplacements et déformations

Une fois les analyses sous OpenDic terminées, il faut exécuter successivement deux programmes Matlab pour obtenir les différents champs de déformations. Le logiciel Fiji/ImageJ est utilisé pour visualiser les résultats (Figure 2.24).



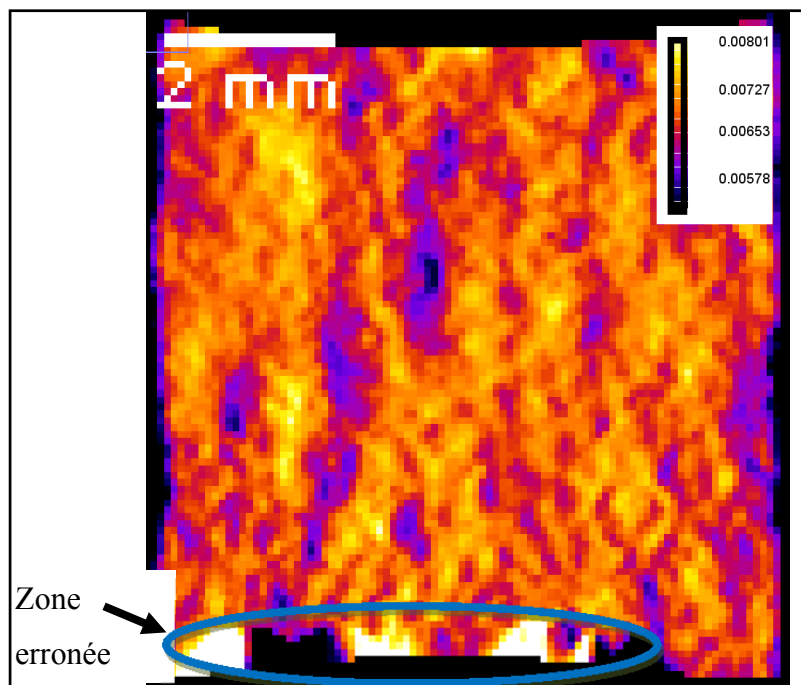


Figure 2.24 Résultats sous Fiji/ImageJ pour une image particulière

En faisant défiler la série d'images obtenue, on peut vérifier rapidement si les résultats sont exploitables : si les couleurs sont discontinues, cela correspond à des niveaux de déformations discontinus et donc l'analyse n'a pas fonctionné. En fonction de l'étendue des erreurs il peut être nécessaire de relancer un calcul en changeant le déplacement de corps solide renseigné, ou alors il est possible de seulement réduire la zone d'exploitation de résultats directement dans Fiji/ImageJ (Figure 2.25).

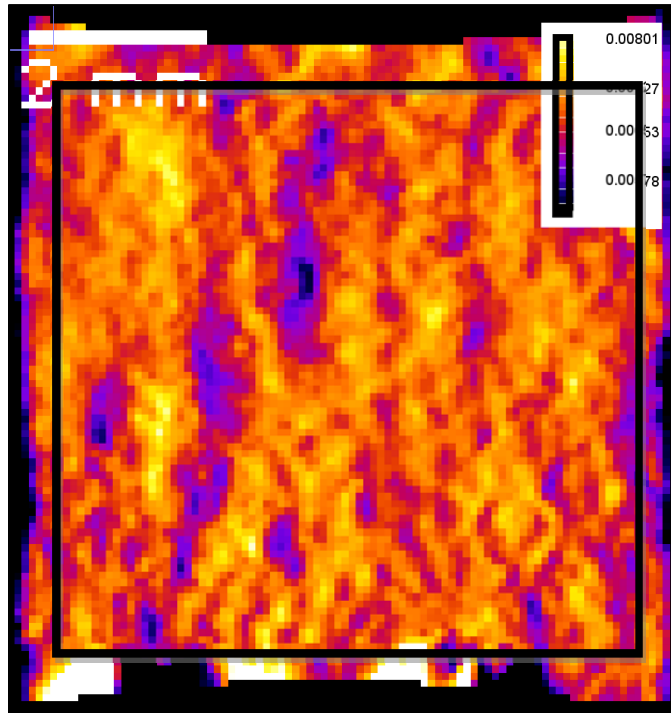


Figure 2.25 Choix de la zone utile pour les déformations

A partir de la zone utile choisie, il est possible d'obtenir un profil des déformations dans le temps. Pour ce faire, les déformations sont moyennées pour chaque image dans la zone utile choisie. Dans notre cas, seules les zones erronées sur les bords sont exclues de la moyenne. Faire la moyenne sur chaque image est possible car les niveaux de déformations sont similaires sur toute la surface choisie (sur la Figure 2.25, déformations comprises entre  $5,7 \cdot 10^{-3}$  et  $8 \cdot 10^{-3}$ ).

La Figure 2.26 montre l'évolution des cartes de déformations dans le temps. Les erreurs restent présentes au cours du temps en revanche les variations de déformations enregistrées pour une carte ne se retrouvent pas sur chaque. Les fluctuations obtenues au sein d'une même carte peuvent être dues à des erreurs optiques : du fait de la chaleur, des fluctuations de l'indice de réfraction de l'air sont probables et peuvent entraîner la déformation des images prises par la caméra de façon hétérogène.

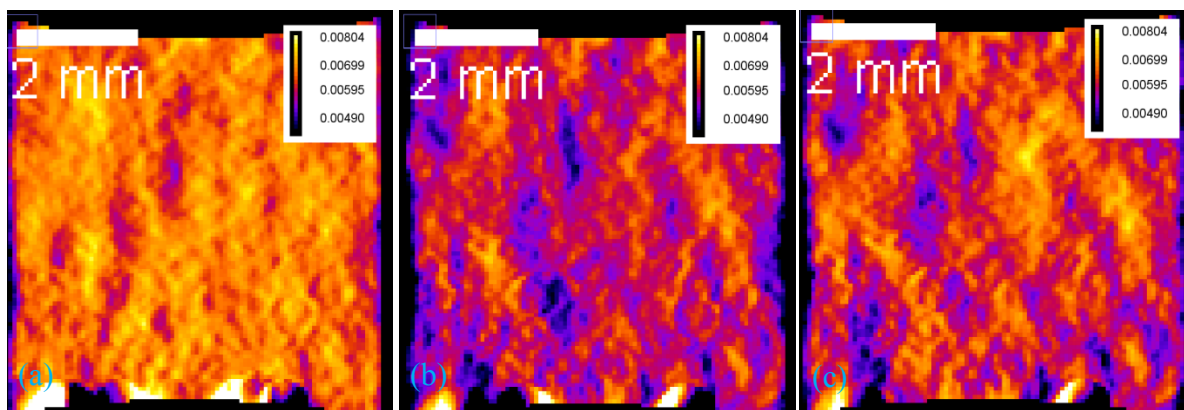


Figure 2.26 Évolution des cartes de déformations obtenues pour l'éprouvette 1 : cycle 1 (a), cycle 230 (b), cycle 500 (c)

En suivant cette méthode de corrélation d'images pour chaque éprouvette testée, les profils de déformations au cours du temps vont être connus. Il est important de noter que cette méthode est précise jusqu'à un niveau de l'ordre de  $10^{-4}$ . Pour les déformations, la limite de résolution se situe entre  $1 \cdot 10^{-4}$  et  $5 \cdot 10^{-4}$ .

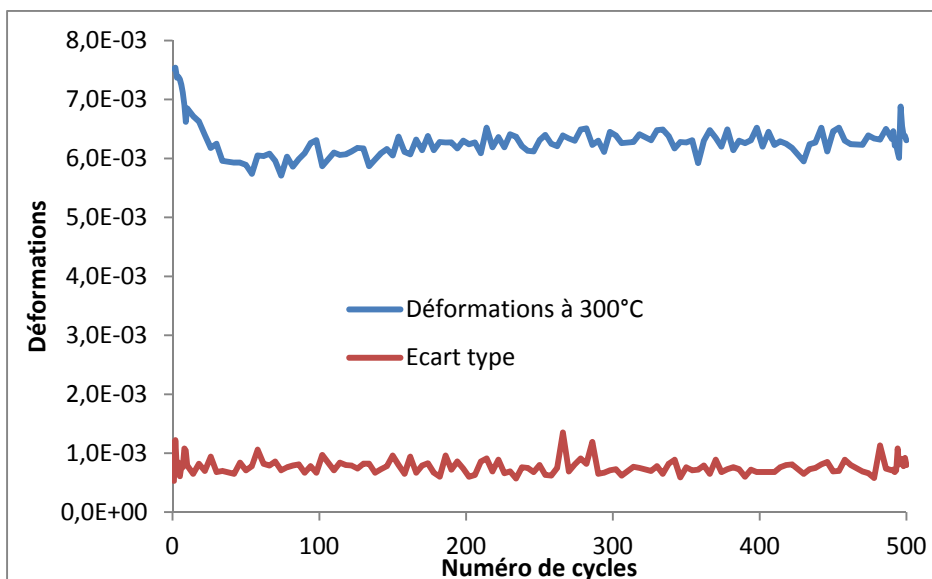


Figure 2.27 Moyenne des déformations et écart type pour l'éprouvette 1

La Figure 2.27 présente la moyenne des déformations à 300 °C obtenues pour l'éprouvette 1 ainsi que l'écart type lié à chaque valeur. L'écart type est de l'ordre de  $8 \cdot 10^{-4}$ . Cette valeur est

la même pour toutes les données obtenues à 300 °C. L'écart type est faible, il permet de dire que les valeurs erronées dues aux effets de bords ont bien été supprimées. Les valeurs de déformations moyennées sont ainsi comprises entre  $6 \cdot 10^{-3}$  et  $8 \cdot 10^{-3}$ , ce qui est cohérent avec les valeurs vues à la Figure 2.25.

### **2.3 Protocole expérimental**

Afin de lancer un essai et d'obtenir des résultats en déformations, plusieurs étapes sont à respecter.

- Réalisation du mouchetis sur l'éprouvette.

Cette étape est la première car réalisée hors du montage. Cependant, le mouchetis est fragile et il faut faire attention à ne pas l'abimer lors de la manipulation postérieure de l'éprouvette.

- Montage de l'éprouvette dans son cadre.

Lors de cette étape, il est important de bien centrer l'éprouvette entre les deux parties du cadre. Une fois l'éprouvette bien positionnée, il est possible d'insérer les tiges filetées sans problème et de serrer les deux parties du cadre ensemble.

- Insertion des cartouches chauffantes et thermocouple.

Les cartouches chauffantes s'insèrent dans les perçages se trouvant dans les coins de l'éprouvette. Une attention particulière est donnée aux fils des cartouches chauffantes qui sont fragiles. En les manipulant le moins possible, ils sont préservés le plus longtemps possible.

- Réglage de la caméra.

Le réglage de la caméra est la partie la plus longue de l'installation car il faut être minutieux lors de la manipulation. La caméra doit être placée à environ 40 cm de la face de l'éprouvette pour assurer une bonne netteté d'image. Une fois la mise au point faite, il faut régler le temps

d'exposition dans le programme LabView gérant la caméra (entre 35 000 et 40 000). Le temps entre chaque prise d'images est choisi dans ce programme également.

- Réglage des paramètres de chauffage.

Dans le programme LabView contrôlant le chauffage et le refroidissement, il faut donner les températures maximales et minimales que l'on veut atteindre dans les cycles thermiques, le nombre de cycles désirés ainsi que le temps de maintien à chaud imposé. La valeur de la puissance maximale autorisée pour les éléments chauffants est par défaut de 100 %. Il est possible de donner une tolérance sur les températures cibles pour gagner du temps sur chaque cycle. Par exemple, en mettant la tolérance à 2 °C, ce qui fait que le passage de la phase de chauffage à celle de maintien s'effectuera dès 298 °C plutôt que 300 °C mais les éléments continueront de chauffer jusqu'à atteindre 300 °C.

Une fois ces étapes réalisées, le test est prêt à être lancé. Si la caméra est utilisée pour le test, il faut faire attention à déclencher les deux programmes LabView contrôlant la température et celui de la caméra au même moment pour les synchroniser, à défaut d'en avoir un unique pour tout contrôler. Cela permettra de synchroniser manuellement les données par la suite.

## **2.4 Tests réalisés**

Pour ce projet, neuf éprouvettes sont à disposition. Différents tests sont imaginés afin de tester l'influence du temps de maintien, l'influence du vieillissement et celle du molybdène (Tableau 2.6).

Le molybdène est un élément intégré à l'alliage pour augmenter la résistance mécanique en fluage (Farkoosh, Chen et Pegguleryuz, 2013). Si du fluage a lieu dans les éprouvettes pendant les tests, il est important de pouvoir comparer les différences de comportement entre une éprouvette avec molybdène et une sans. Cette comparaison pourra être faite après les tests des éprouvettes 2 et 3. De la même façon une comparaison de l'effet du vieillissement pourra être faite après les tests des éprouvettes 1 et 2.

Tableau 2.6 Tests prévus pour chaque éprouvette

	<b>Lot1: A356 non modifié</b>	<b>Lot 2 : A356 modifié au Strontium</b>
<b>A356+0,5Cu +0,15Mo</b>	N°4 3000 cycles, 30 secondes de maintien	N°1 500 cycles, 30 secondes de maintien
	N°6	N°2 vieillie au four 100 h à 300 °C 500 cycles, 30 secondes de maintien
<b>A356+0,5Cu</b>	N°7 Calibration du montage et essai des éléments chauffants	N°3 vieillie au four 100 h à 300 °C 500 cycles, 30 secondes de maintien
	N°8 3000 cycles, 2 minutes de maintien	
	N°9 750 cycles, 8 minutes de maintien	N°5

Les essais planifiés sont longs : pour 500 cycles avec 30 secondes de temps de maintien, le temps nécessaire pour compléter un essai est estimé à sept jours. Cette durée est choisie pour les tests de comparaison décrits précédemment. Des tests avec un nombre de cycles plus élevé sont aussi prévus : si une éprouvette passe 2 minutes à 300 °C et est testée sur 3000 cycles, elle aura au total passé 100 heures à 300 °C. Il en est de même pour une éprouvette testée sur 750 cycles avec 8 minutes de temps de maintien. Il sera alors intéressant de comparer les microstructures des éprouvettes afin de vérifier s'il y a eu homogénéisation semblable à celle obtenue après vieillissement au four. Enfin, la variation du temps de maintien pourra aussi entraîner des différences de comportement mécanique lié au fluage : si les éprouvettes fluent, l'accumulation devrait être plus élevée pour un temps de maintien de deux minutes que pour un temps de maintien de 30 secondes. Deux éprouvettes n'ont pas de test prévu, les tests seront décidés en fonction des résultats obtenus avec les éprouvettes 1 à 4.

L'ensemble des essais a donc pour but de mettre en place une méthode simple de tests des matériaux utilisés pour les culasses de moteur diesel afin de connaître leur comportement et

pouvoir prédire la durée de vie exacte des pièces. Cette durée de vie devra prendre en compte les effets du fluage ainsi que celui de la fatigue liés aux conditions d'utilisation des moteurs.

À cause de la longue durée des essais, seules les éprouvettes 1 à 4 sont testées dans le cadre de cette maîtrise, en plus de l'éprouvette 9 utilisée pour calibrer le montage. Pour l'éprouvette 1, le test doit durer 6 semaines donc il n'est pas possible de le suivre en continu avec la caméra pour faire de la corrélation d'images : seuls quelques cycles seront suivis de façon ponctuelle. Pour les éprouvettes 1 à 3, les tests doivent durer une semaine et il sera alors possible de suivre tous les cycles. Les conditions expérimentales de ces essais sont données dans le Tableau 2.7

Tableau 2.7 Paramètres des essais effectués

<b>Paramètres</b>	<b>Éprouvette 4</b>	<b>Éprouvettes 1, 2, 3</b>
<b>Température maximale</b>	300 °C	300 °C
<b>Température minimale</b>	50 °C	50 °C
<b>Nombre de cycles demandés</b>	3000	500
<b>Temps de maintien</b>	30 s	30 s
<b>Tolérance sur la température à chaud</b>	3 °C	3 °C
<b>Temps entre deux prises de photos</b>	5 s sur trois cycles de façon ponctuelle	40 s pendant tout le test





## CHAPITRE 3

### RÉSULTATS ET ANALYSES

Dans ce chapitre, après avoir présenté la méthode de dépouillement des données, les résultats obtenus pour chaque éprouvette testée (Tableau 3.1) sont présentés puis comparés en fonction des différences de composition ou de vieillissement.

Tableau 3.1 Rappel des compositions des éprouvettes testées dans ce projet

		<b>Cu(%)</b>	<b>Mo(%)</b>	<b>Sr</b>	<b>Vieillessement 100h à 300 °C</b>
<b>Éprouvette 1</b>	A356	0,5	015	oui	non
<b>Éprouvette 2</b>	A356	0,5	0,15	oui	oui
<b>Éprouvette 3</b>	A356	0,5	0	oui	oui
<b>Éprouvette 4</b>	A356	0,5	0	non	non

#### 3.1 Dépouillement des résultats

Pour chaque test effectué, un fichier texte contenant toutes les données de temps, température et cycles est généré. Si de plus le déplacement est suivi par caméra, un deuxième fichier est généré par le programme LabView contrôlant la caméra. Avec ces fichiers, il est possible de déduire la durée de chaque cycle, la température à laquelle chaque photo a été prise... Dépendamment de ce que l'on cherche comme information, les procédures sont différentes pour obtenir les résultats.

##### 3.1.1 Durée des cycles

Que l'on fasse un test de 500 cycles ou 3000 cycles, un fichier texte est généré avec les informations de temps, température et numéro de cycles. Pour connaître la durée de chaque cycle, il faut donc repérer dans le fichier obtenu le début de chaque cycle. Ensuite, on ajoute

une donnée manuellement, celle des temps de cycles. Pour se faire, il suffit de remettre à zéro le temps à chaque fois que l'on change de cycle puis de calculer la différence entre chaque point de données pour avoir l'évolution de la durée des cycles (Figure 3.1).

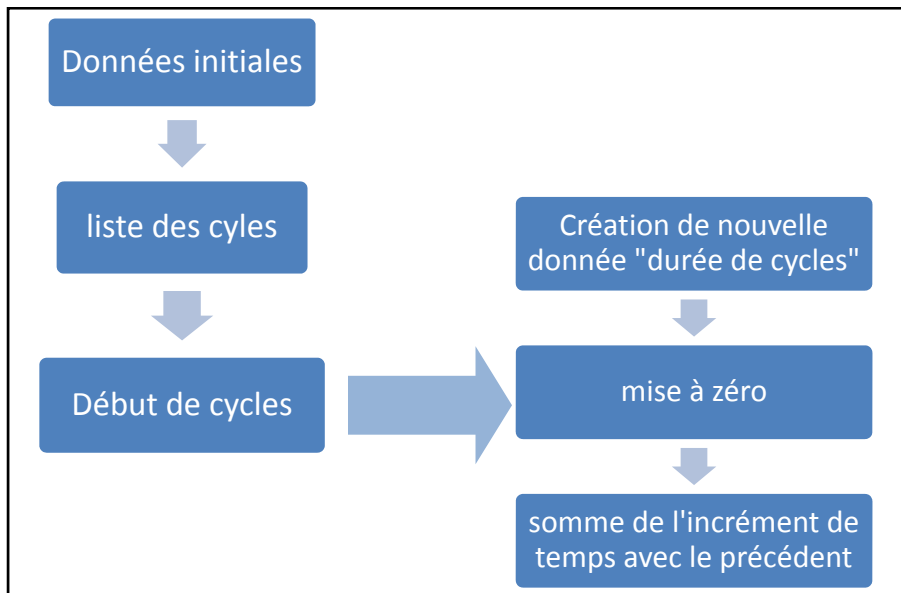


Figure 3.1 Représentation schématique du traitement des données pour la durée des cycles thermiques

### 3.1.2 Traitement pour les images

Pour un test avec caméra, on doit travailler sur les deux fichiers textes, celui contenant les données expérimentales liées à la température et l'autre contenant les indications liées aux photos. Comme les deux fichiers contiennent des informations de temps, la toute première chose à faire est de recalibrer les temps entre les deux. La plupart du temps, les programmes ont été lancés simultanément mais le chauffage a été déclenché plus tard. Il est important de repérer le début des cycles sur les données liées aux photos pour ensuite pouvoir lier les températures aux numéros de photos (Figure 3.2).

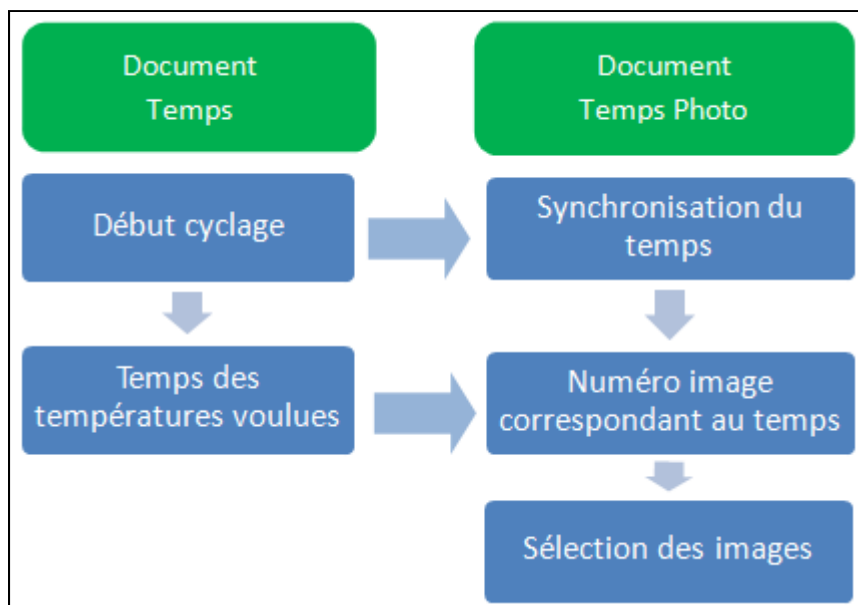


Figure 3.2 Schéma de la procédure de tri des images

La prise d'images était soit espacée de 40 secondes lorsque l'on suivait un essai sur 500 cycles, soit espacée de 5 secondes ou moins lorsque l'on suivait quelques cycles aléatoirement. Lors d'une prise d'images toutes les 40 secondes, il faut sélectionner les photos qui nous intéressent pour l'analyse (Figure 3.3).

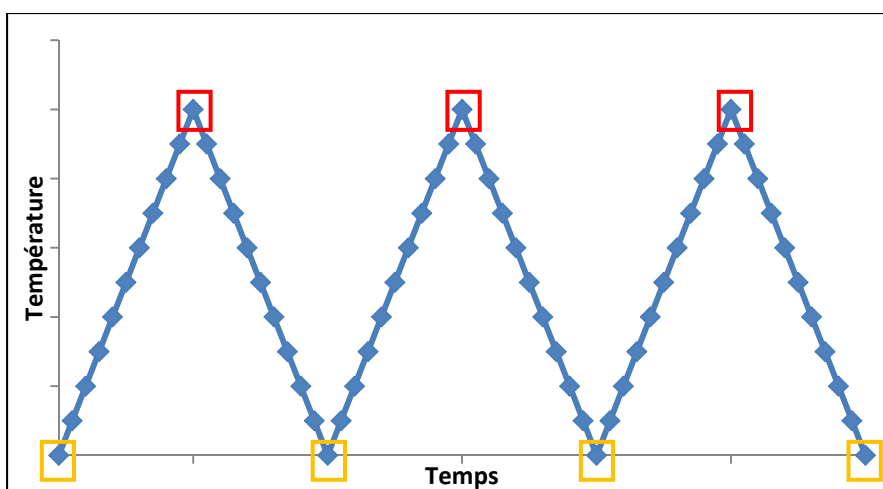


Figure 3.3 Choix des images en fonction de la température

Une fois les images choisies en fonction de la température, il faut refaire une sélection pour ne pas avoir plus de 200 images à analyser. Par exemple, pour le suivi de 500 cycles, les images des 10 premiers et 10 derniers cycles sont gardées mais entre les 11<sup>e</sup> et 490<sup>e</sup> cycles, seule une image sur quatre est conservée.

### 3.2 Durée des cycles

Avant de s'intéresser aux déformations développées dans chaque éprouvette, la durée des cycles est étudiée. Cette donnée permet de voir l'efficacité des systèmes de chauffage et refroidissement utilisés. Le temps de chaque cycle pour dix cycles consécutifs choisis arbitrairement pour différentes éprouvettes est présenté sur la Figure 3.4.

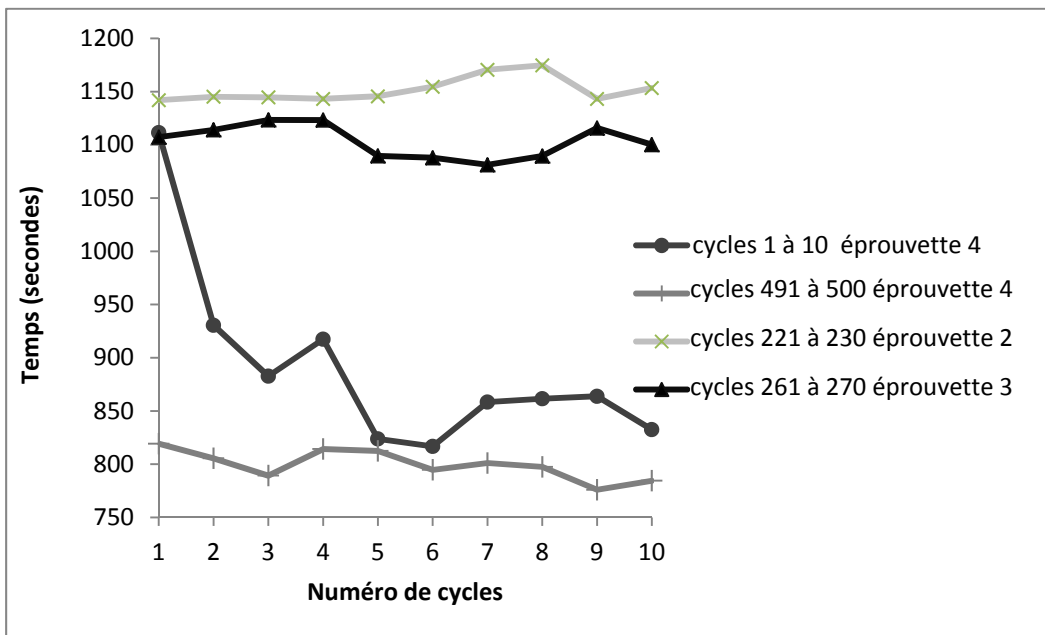


Figure 3.4 Variations des durées de cycles pendant les 10 premiers cycles

Les durées sont très variées (entre 790 secondes et 1170 secondes), que ce soit pour une même éprouvette ou non. Les durées de cycles pour l'éprouvette 4 sont plus courtes mais le test était interrompu chaque soir alors que pour les éprouvettes 2 et 3 les tests se sont faits sans interruption. Ces variations peuvent être attribuées aux variations de température dans la

pièce, variations d'humidité mais aussi au système de refroidissement choisi : le compresseur délivrant l'air comprimé est très sollicité et n'a pas le temps de refaire sa réserve d'air entre chaque cycle. Cette hypothèse permet aussi d'expliquer pourquoi les cycles de l'éprouvette 4 sont plus courts.

La durée des cycles n'est pas un paramètre permettant de conclure sur la reproductibilité des tests car les variations sont trop importantes mais cela ne remet pas en cause la méthode utilisée. Il faut s'intéresser aux déformations pour pouvoir conclure sur l'efficacité du montage.

### **3.3 Suivi ponctuel de cycles pour un test de 3000 cycles**

#### **3.3.1 Comparaison des évolutions de la température et des déformations**

Sur une éprouvette de composition A356+0,5Cu+0,15Mo (éprouvette 4), 3000 cycles avec 30 secondes de temps de maintien sont effectués. Les 500 premiers cycles se font sur deux semaines car l'essai est interrompu tous les soirs. Les 2500 autres cycles sont faits sur une durée de 5 semaines, l'essai étant interrompu ponctuellement pour inspecter l'état de l'éprouvette. Sur cet essai, des cycles complets sont suivis avec la caméra, de façon aléatoire. Le but étant de valider la méthode de corrélation d'images et de voir si les déformations mesurées en surface dans la hauteur ( $\epsilon_{xx}$ ) au cours des cycles évoluent ou non.

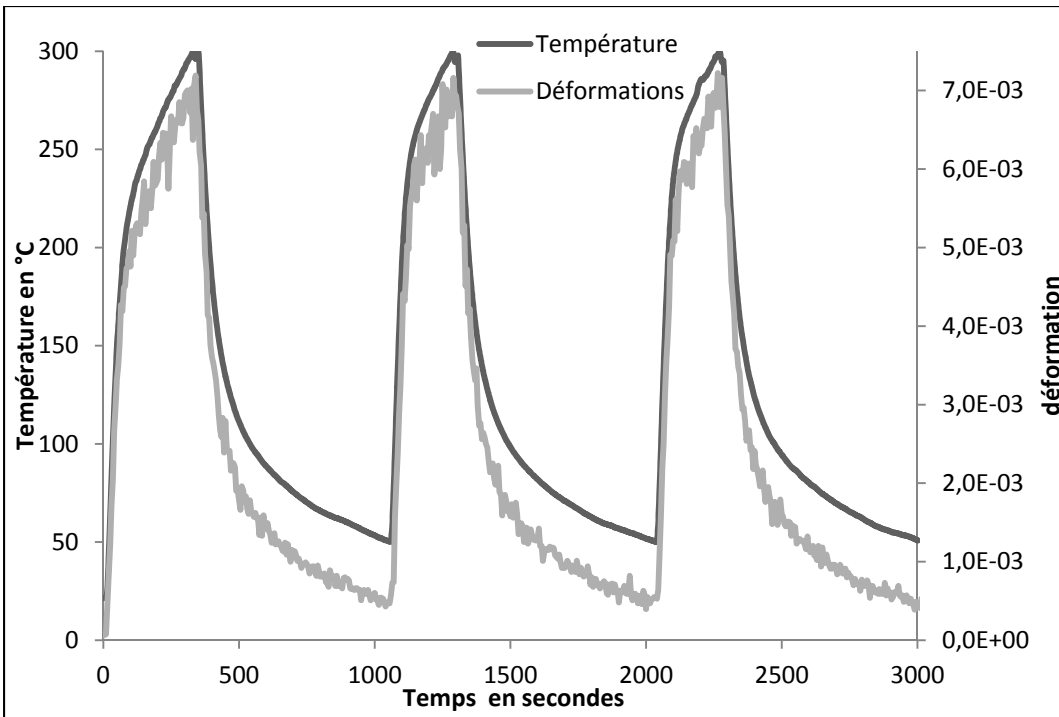


Figure 3.5 Évolution de la température et de la déformation  $\epsilon_{xx}$  pour l'éprouvette 4 lors des cycles 1900 à 1902

Afin de valider la méthode, les courbes de déformations et de température en fonction du temps sont comparées. La déformation thermique contribuant grandement à la déformation totale mesurée, on s'attend à un comportement semblable entre courbe de température et courbe de déformations. C'est ce que confirme la Figure 3.5 : les extrema sont atteints au même moment pour les déformations et la température.

### 3.3.2 Évolution des déformations au cours du temps

Les déformations sont suivies sur trois cycles à différents moments du test. La Figure 3.6 présente la superposition des déformations en fonction du temps telles qu'enregistrées sur trois cycles.

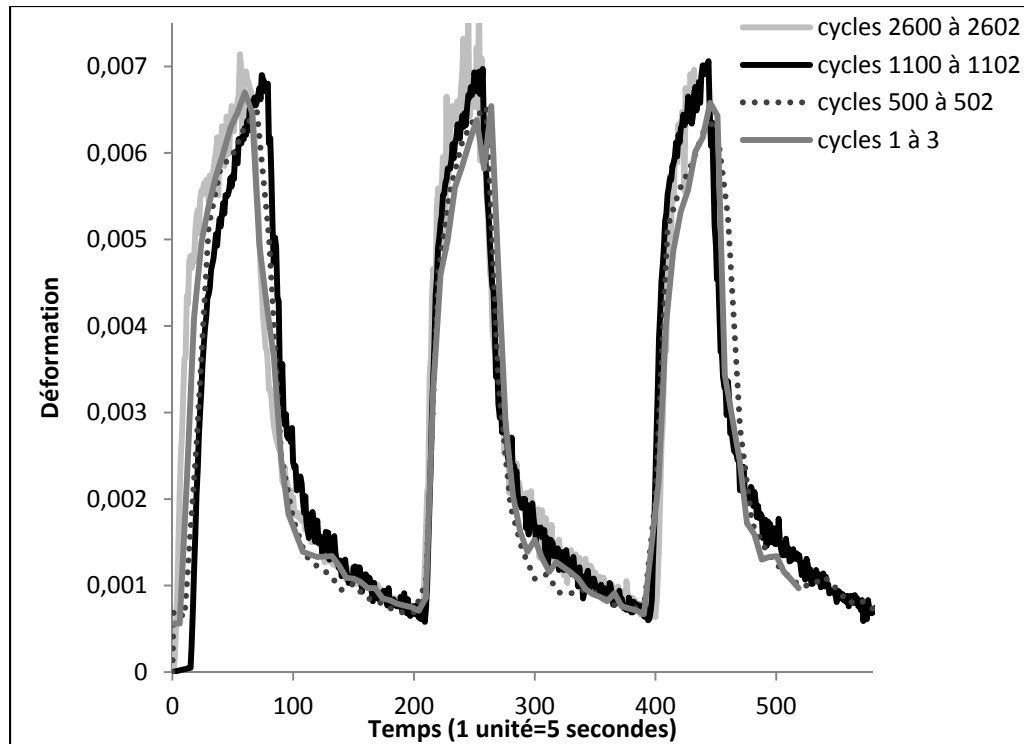


Figure 3.6 Déformations  $\varepsilon_{xx}$  en fonction du temps pour l'éprouvette 4

Cette visualisation n'est pas adéquate car les durées de cycles sont différentes et les niveaux de déformations sont très proches pour pouvoir distinguer de réelles différences entre chaque série de cycles.

Les déformations sont alors exprimées en fonction de la température (Figure 3.7). Les valeurs des déformations des trois cycles précédents ont été moyennées pour donner une unique courbe de déformations en fonction de la température pour chaque groupe de cycles. Les phases de chauffage et refroidissement sont distinctes pour tous les cycles représentés. Hormis pour le premier cycle, les niveaux de déformations en chauffage augmentent avec le temps : les déformations sont plus élevées pour la moyenne des cycles 2600 que pour celles des cycles 1100 et 500. Pour les cycles 1100 et 2600 les déformations lors du refroidissement ne diminuent pas aussi rapidement que pour les cycles 1 et 500. Une augmentation de déformations est aussi enregistrée pour la phase de maintien de température.

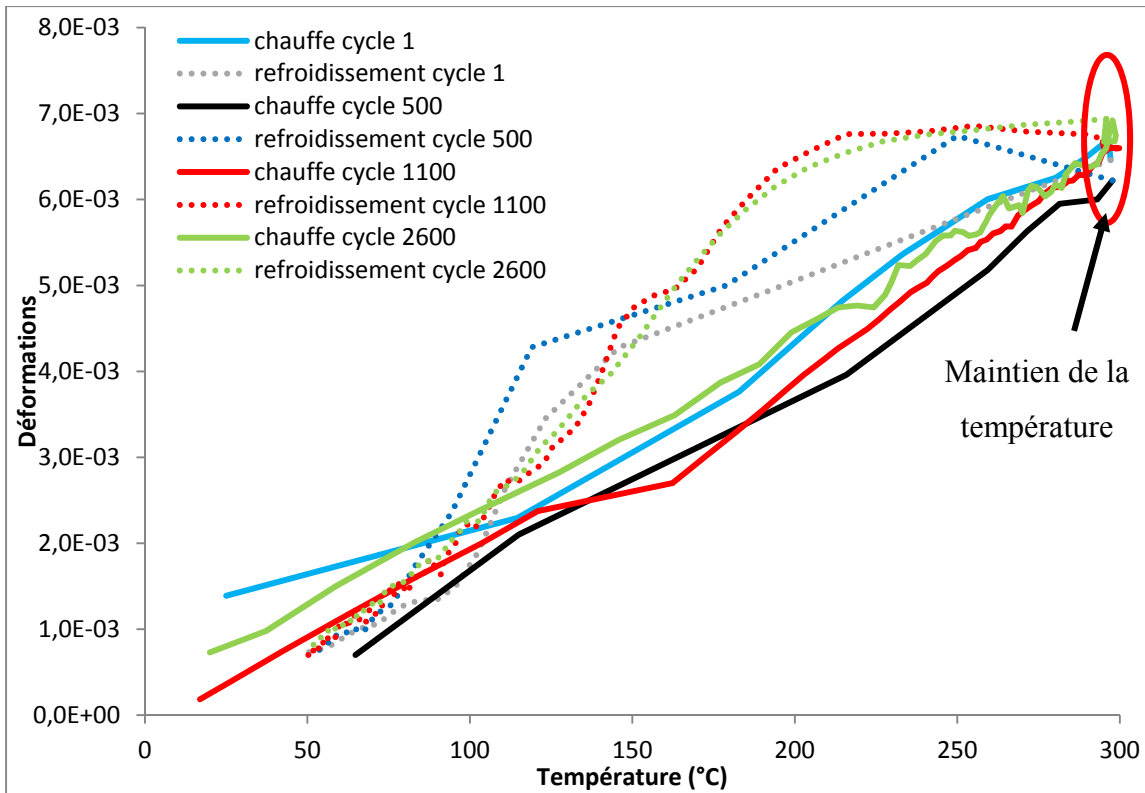


Figure 3.7 Déformations  $\varepsilon_{xx}$  en fonction de la température pour différents cycles pour l'éprouvette 4

La différence de comportement du 1<sup>er</sup> cycle par rapport aux suivants peut être attribuée à un effet de début de test : l'éprouvette est non contrainte dans la direction analysée au départ (jeu du montage) et non déformée donc le premier chauffage conduit à une déformation thermique pure jusqu'à combler le jeu. Pour les cycles suivants, l'augmentation peut être liée à une accumulation de déformations ayant lieu au cours du temps.

Concernant la variation de déformations pendant le maintien, il peut s'agir soit d'erreur de mesure liée à la précision de la méthode soit au processus de fluage. L'augmentation de déformations pour les cycles 500, 1100 et 2600 lors du chauffage, peut être liée à ce même phénomène. Enfin, pour les déformations observées lors du refroidissement des cycles 1100 et 2600, il est possible que des déformations plastiques soient apparues, limitant la contraction thermique s'opérant lors des autres cycles.



Afin de confirmer ou infirmer les hypothèses faites pour le comportement de l'éprouvette sur 3000 cycles, il serait intéressant de suivre quelques cycles thermiques en prenant une image tous les degrés gagnés ou perdus et en prenant une image par seconde pendant le maintien. Cela permettrait d'avoir un suivi de la déformation en fonction de la température plus précis.

### 3.4 Déformations sur 500 cycles

Le deuxième type de test réalisé est un suivi complet de 500 cycles, dans le but de connaître l'évolution des déformations  $\epsilon_{xx}$  à 300 °C et 50 °C. Trois éprouvettes sont testées de cette façon-là. Toutes contiennent du strontium, deux ont été vieilles 100 heures au four à 300 °C et deux contiennent du molybdène (Tableau 3.2). Chaque test s'est déroulé sur une semaine sans interruption.

Tableau 3.2 Composition des éprouvettes testées sur 500 cycles

		<b>Cu(%)</b>	<b>Mo(%)</b>	<b>Sr</b>	<b>Vieillessement 100h à 300 °C</b>
<b>Éprouvette 1</b>	A356	0,5	015	oui	non
<b>Éprouvette 2</b>	A356	0,5	0,15	oui	oui
<b>Éprouvette 3</b>	A356	0,5	0	oui	oui

Deux corrélations d'images ont été faites, la première avec les images prises à 50 °C et la deuxième avec les images à 300 °C mais la même image initiale prise à 20 °C avant le début du test a été utilisée.

#### 3.4.1 Résultats par éprouvettes

##### 3.4.1.1 Éprouvette n°1 (A356+0,5Cu+0,15Mo+Sr sans vieillessement)

La première éprouvette étudiée pour ce test est l'éprouvette 1 de composition A356+0,5Cu+0,15Mo+Sr, non vieillesse. Les déformations  $\epsilon_{xx}$  obtenues à 300 °C et 50 °C sont données dans la Figure 3.8.

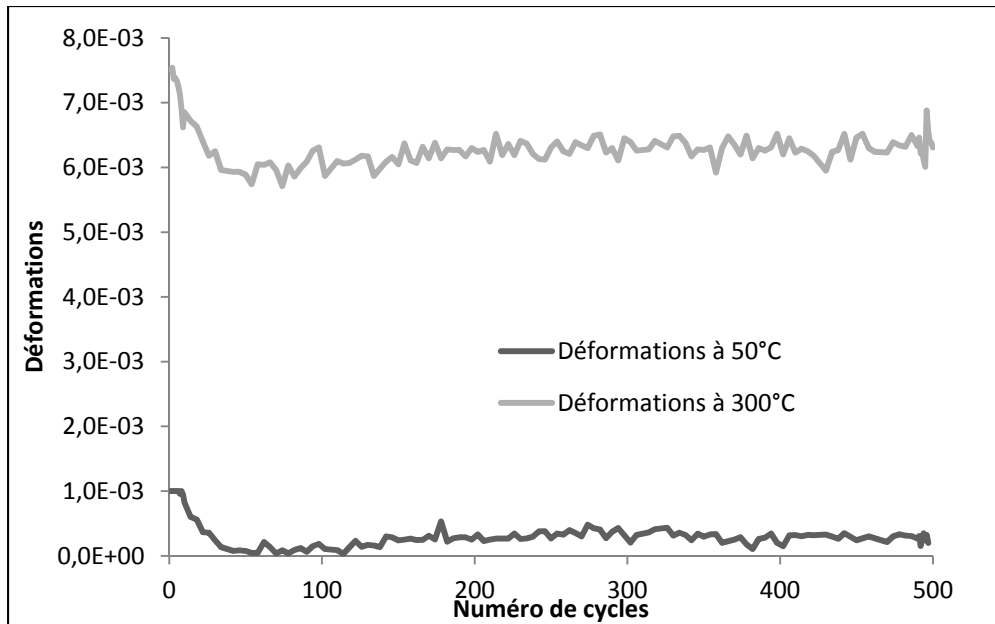


Figure 3.8 Déformation  $\varepsilon_{xx}$  en fonction du temps pour l'éprouvette 1

Les déformations à 300 °C sont comprises entre  $6 \cdot 10^{-3}$  et  $7,6 \cdot 10^{-3}$  et celles à 50 °C entre  $5 \cdot 10^{-5}$  et  $1 \cdot 10^{-3}$ . Les deux courbes suivent la même tendance, on peut observer une diminution du taux de déformations sur les 20 premiers cycles puis une stabilisation entre  $6 \cdot 10^{-3}$  et  $6,5 \cdot 10^{-3}$  à 300 °C et entre  $2 \cdot 10^{-4}$  et  $4 \cdot 10^{-4}$ . Les signaux obtenus sont bruités : les limites de résolution de la méthode sont à prendre en compte pour la courbe à 50 °C puisque les déformations sont de l'ordre de  $10^{-4}$ .

#### 3.4.1.2 Éprouvette n°2 (A356+0,5Cu+0,15Mo+Sr avec vieillissement)

La deuxième éprouvette testée a la même composition que la précédente mais est vieillie 100 heures au four à 300 °C avant de subir 500 cycles thermiques.

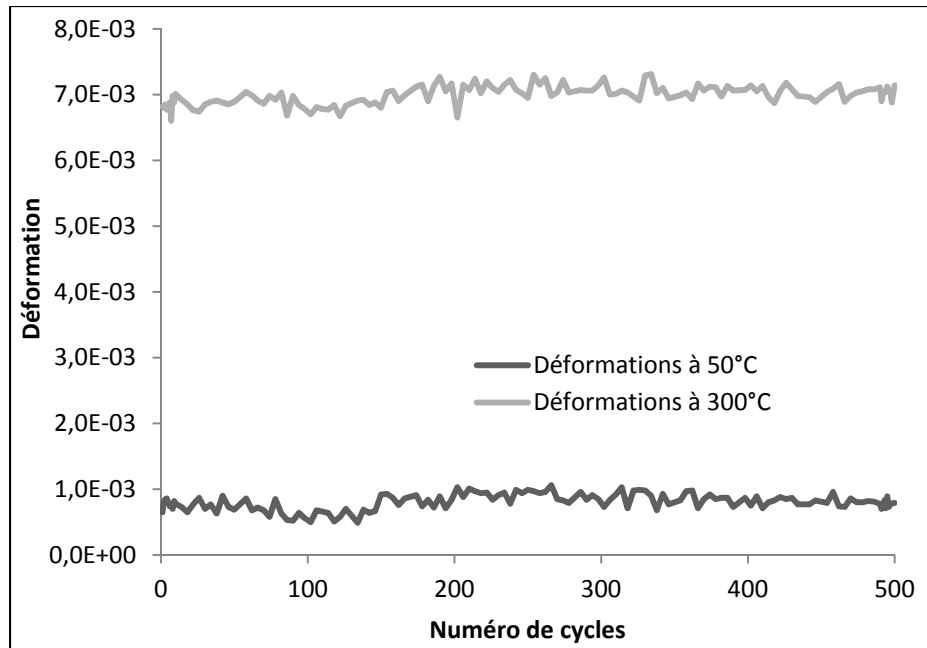


Figure 3.9 Déformations  $\varepsilon_{xx}$  en fonction du temps pour l'éprouvette 2

La Figure 3.9 présente les déformations  $\varepsilon_{xx}$  obtenues à 50 °C et 300 °C. Pour la première température citée les déformations sont comprises entre  $5 \cdot 10^{-4}$  et  $1,1 \cdot 10^{-3}$  alors que pour la seconde elles sont comprises entre  $6,6 \cdot 10^{-3}$  et  $7,3 \cdot 10^{-3}$ . Les déformations sont moins dispersées que pour la première éprouvette testée et le comportement aux deux températures est similaire. De la même façon que précédemment, un bruit important est observé pour les déformations à 50 °C bien que celles-ci n'excèdent pas  $5 \cdot 10^{-4}$ . Il est possible de voir une variation de l'ordre de  $3 \cdot 10^{-4}$  entre deux cycles pour la déformation à 50 °C.

### 3.4.1.3 Éprouvette n°3 (A356+0,5Cu+Sr avec vieillissement)

Pour l'éprouvette 3, vieillie 100 heures au four à 300 °C et qui ne contient pas de molybdène, les déformations  $\varepsilon_{xx}$  sont présentées dans la Figure 3.10.

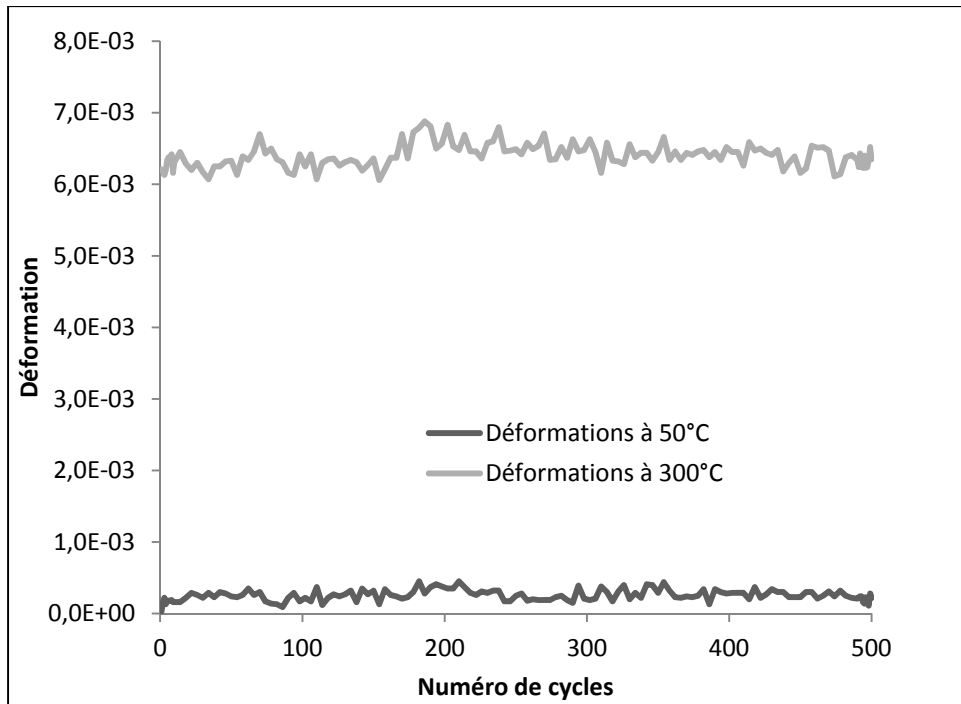


Figure 3.10 Déformations  $\varepsilon_{xx}$  en fonction du temps pour l'éprouvette 3

La première remarque est liée au signal très bruité que l'on a pour les images à 50 °C. Les déformations étant très faibles car inférieures à  $5 \cdot 10^{-4}$  (entre  $5 \cdot 10^{-5}$  et  $4,5 \cdot 10^{-4}$ ) la limite de la résolution de la méthode d'analyse utilisée est atteinte. À 300 °C, les déformations sont comprises entre  $6 \cdot 10^{-3}$  et  $7 \cdot 10^{-3}$ . Ce sont les plus faibles enregistrées pour cette température sur les trois éprouvettes. La dispersion des valeurs est semblable à celle obtenue pour les déformations de l'éprouvette 2 et les profils obtenus aux deux températures sont aussi similaires à ceux obtenus sur la Figure 3.9.

### 3.4.2 Effet du vieillissement et du molybdène

Les trois éprouvettes testées présentent des différences de composition ou de traitement thermique. Le but est d'étudier les effets de ces variations en comparant les résultats obtenus ensemble. Ici, seuls les résultats à 300 °C sont exploités. En effet, les résultats obtenus à 50 °C présentent des valeurs dans la limite de résolution de la méthode d'analyse donc il est difficile de les prendre en considération.

Étant donné que la part thermique est dominante dans les déformations à 300 °C, les comparaisons sont réalisées en soustrayant cette part pour ne laisser que les déformations mécaniques. Cependant, ces dernières sont faibles et dépendamment du coefficient d'expansion thermique appliqué, les résultats diffèrent. Les résultats sont alors présentés pour deux valeurs de coefficient d'expansion thermique (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 Déformations thermiques en fonction du coefficient d'expansion thermique  $\alpha$

	<b>A356 commercial</b>	<b>Aluminium pur</b>
<b>Coefficient d'expansion thermique <math>\alpha</math> (/°C)</b>	23,5·10 <sup>-6</sup> (Barlas, 2004)	25,5·10 <sup>-6</sup> (Mondolfo, 1976)
<b>Déformation thermique entre 20 °C et 300 °C</b>	6,58·10 <sup>-3</sup>	7,14·10 <sup>-3</sup>

#### 3.4.2.1 Effet du vieillissement

Dans cette partie, les déformations mécaniques obtenues pour les éprouvettes ayant la composition suivante : A356+0,5Cu+0,15Mo+Sr sont comparées. L'une (éprouvette 2) a été vieillie 100 heures au four, l'autre (éprouvette 1) n'a subi aucun traitement thermique après la coulée de la plaque. Dans un premier temps, les déformations sont données pour le coefficient d'expansion thermique  $\alpha=23,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  puis ensuite pour  $\alpha=25,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .

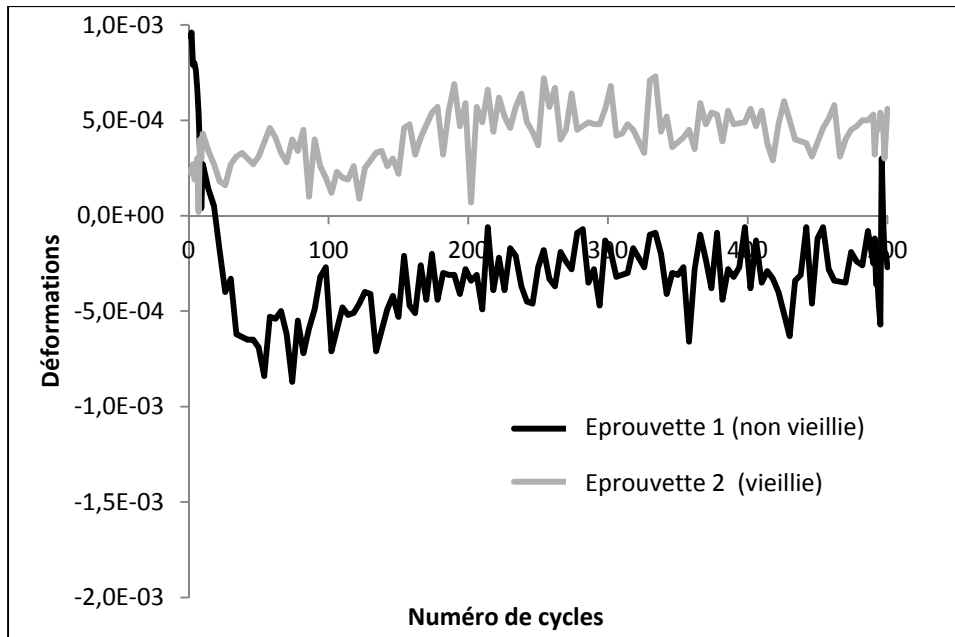


Figure 3.11 Comparaison de la déformation mécanique  $\epsilon_{xx}$  pour des éprouvettes A356+0,5Cu+0,15Mo+Sr avec (Éprouvette 2) ou sans vieillissement (Éprouvette 1) à 300 °C avec coefficient d'expansion thermique  $\alpha=23,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Dans ce premier cas (Figure 3.11), les déformations mécaniques traduisent de la tension pour l'éprouvette 2 (entre  $1 \cdot 10^{-4}$  et  $6 \cdot 10^{-4}$ ) et de la tension suivie de compression pour l'éprouvette 1 (entre  $-8 \cdot 10^{-4}$  et  $1 \cdot 10^{-3}$ ). Outre cette différence de sollicitation, les allures des courbes ne sont pas similaires : la chute importante enregistrée pour l'éprouvette 1 non vieillie ne se produit pas pour l'éprouvette 2 vieillie 100 heures au four.

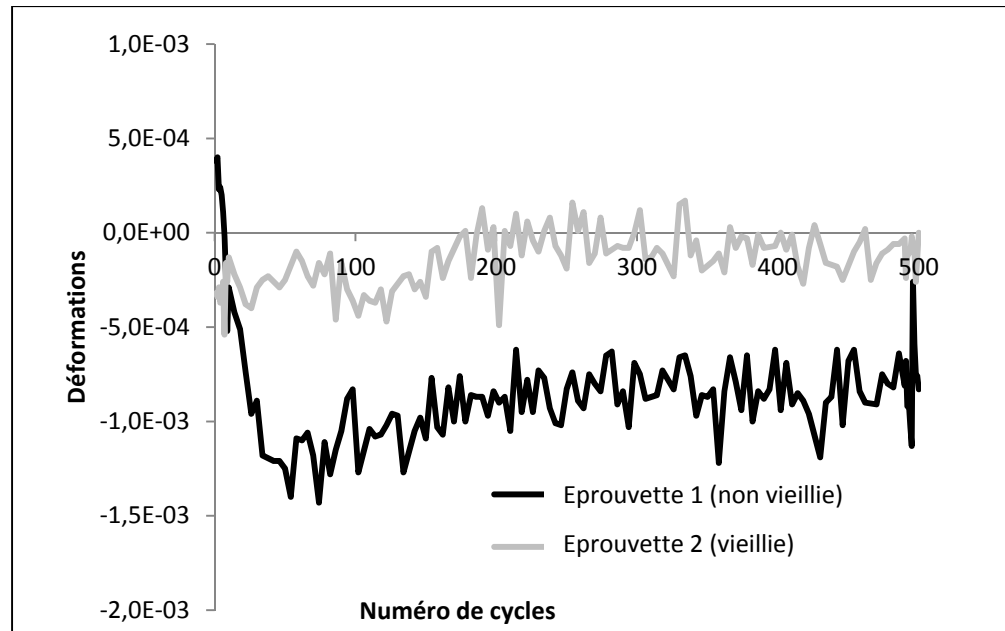


Figure 3.12 Comparaison de la déformation mécanique  $\varepsilon_{xx}$  pour des éprouvettes A356+0,5Cu+0,15Mo+Sr avec (Éprouvette 2) ou sans vieillissement (Éprouvette 1) à 300 °C avec coefficient d'expansion thermique  $\alpha=25,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Avec un coefficient d'expansion thermique plus grand correspondant à celui de l'aluminium pur, (Figure 3.12), l'éprouvette 2 vieillie est en compression (à l'exception de quelques points, que l'on peut attribuer à une erreur de précision) mais avec des niveaux de déformations faibles, (entre 0 et  $-5 \cdot 10^{-4}$ ). Lors des premiers cycles, l'éprouvette 1 est toujours en tension. Cependant, la bascule en compression a lieu plus tôt avec ce coefficient d'expansion thermique.

L'utilisation d'un coefficient d'expansion thermique plus élevé permet d'avoir de la compression pour les deux éprouvettes mais à faibles niveaux. Par contre, l'éprouvette 1 est dans tous les cas en tension pour les premiers cycles. Ce comportement semble lié au non vieillissement, mais la cause reste à déterminer. Pour les cycles suivants, les niveaux de déformations de l'éprouvette 2 sont plus faibles en valeur absolue que ceux de l'éprouvette 1, ce qui laisse à penser que l'alliage vieilli est moins sensible aux déformations.

### 3.4.2.2 Effet du Molybdène

L'influence du molybdène est étudiée en comparant les déformations mécaniques des éprouvettes 2 (avec molybdène) et 3 (sans molybdène). Les deux éprouvettes ont été vieilles 100 heures au four. De la même façon que précédemment, les résultats sont présentés dans un premier temps avec un coefficient d'expansion thermique  $\alpha=23,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  puis avec  $\alpha=25,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .

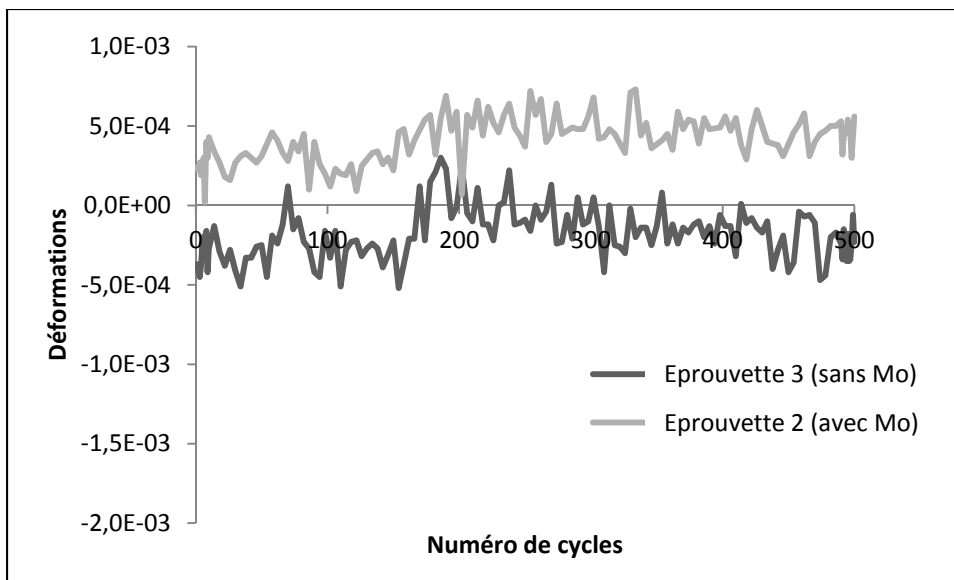


Figure 3.13 Comparaison de la déformation mécanique  $\epsilon_{xx}$  à 300 °C pour les éprouvette 2 (avec Mo) et 3 (sans Mo), sans déformation thermique, avec coefficient d'expansion thermique  $\alpha=23,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Sur la Figure 3.13, l'éprouvette 3 est en tension autour de 200 cycles et est en compression ailleurs. Les allures des courbes sont similaires avec des déformations de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-4}$  en valeur absolue pour les deux éprouvettes.



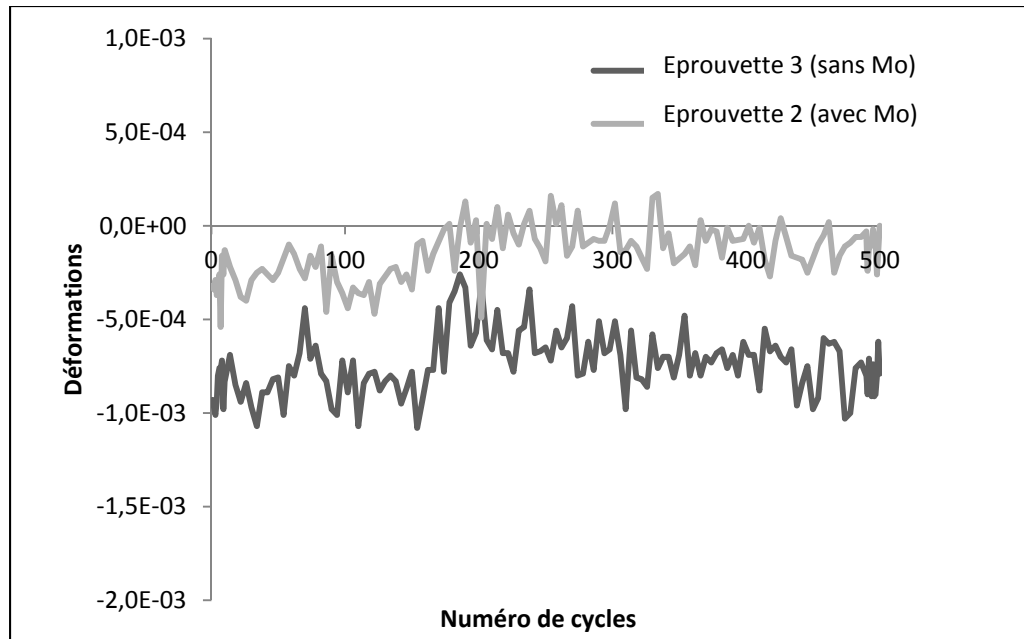


Figure 3.14 Comparaison de la déformation mécanique  $\epsilon_{xx}$  à 300 °C pour les éprouvettes 2 (avec Mo) et 3 (sans Mo), sans déformation thermique, avec coefficient d'expansion thermique  $\alpha=25,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Avec  $\alpha=25,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  (Figure 3.14), les niveaux de déformations relevés sont plus importants en valeur absolue pour l'éprouvette 3 (sans molybdène) que pour l'éprouvette 2. Le molybdène, ajout fait dans l'alliage d'aluminium A356 pour augmenter sa résistance au fluage à haute température (Farkoosh, Grant Chen et Pegguleryuz, 2014) semble faire diminuer les déformations dans l'éprouvette. Cependant, ce résultat dépend du coefficient d'expansion thermique.

Le vieillissement et l'ajout de molybdène semblent modifier le comportement mécanique des éprouvettes sur 500 cycles thermiques mais du fait des faibles niveaux de déformations enregistrés, il est nécessaire de connaître le coefficient d'expansion thermique avant de pouvoir tirer des conclusions.

### **3.5 Bilan de l'étude expérimentale**

Dans ce chapitre, les résultats obtenus expérimentalement ont été présentés pour des tests de 500 cycles thermiques ou 3000 cycles thermiques. La méthode de corrélation d'images utilisée pour l'analyse des déformations a été validée via la comparaison des déformations et de la température en fonction du temps.

Pour le test de 3000 cycles thermiques, le suivi des déformations en fonction du temps ne permet pas de conclure à une évolution du niveau de déformations au cours du temps. En revanche l'évolution des déformations en fonction de la température sur différents cycles permet de voir une augmentation des déformations notamment sur le début du refroidissement à partir de 1000 cycles, mais cela reste à confirmer en faisant un suivi plus précis.

Pour les tests de 500 cycles thermiques, les résultats sont difficiles à exploiter car les niveaux de déformations mécaniques sont faibles et le coefficient d'expansion thermique n'a pas été mesuré. Le vieillissement ainsi que le molybdène semblent jouer un rôle sur le comportement mécanique mais il n'est pas possible de tirer des conclusions précises.

Une simulation numérique du banc d'essai doit être réalisée pour comprendre les chargements et les sollicitations développées dans les éprouvettes pendant les cycles et pour comprendre l'effet des jeux dans le montage.

## **CHAPITRE 4**

### **SIMULATION NUMÉRIQUE**

Afin de déterminer les temps de chauffe, la répartition de chaleur dans le montage et connaître les chargements appliqués à l'éprouvette, une simulation numérique est effectuée à l'aide du logiciel de multi physiques COMSOL. Seules les phases de chauffage et maintien sont étudiées. Pour ce faire, deux étapes sont réalisées, à la suite, la première pour la simulation du chauffage et la deuxième pour celle du maintien.

#### **4.1 Géométrie et données matériaux**

##### **4.1.1 Géométrie**

L'ensemble du montage tel que conçu sous CATIA présente des symétries aussi bien thermiques que mécaniques. Ces symétries permettent de ne modéliser qu'un huitième de la géométrie totale connue. Deux pièces sont alors dessinées dans le module de dessin de COMSOL, l'une représentant le cadre et l'autre l'éprouvette. Les dimensions sont les mêmes que celles utilisées pour la conception avec le logiciel CATIA. Les perçages liés à la visserie sont négligés par soucis de simplification. Par contre, un jeu géométrique est introduit entre le cadre et l'éprouvette en hauteur. Ce jeu est mesuré sur les pièces directement. Il est fixé à 0,065 mm et il sera modifié pour étudier son effet.

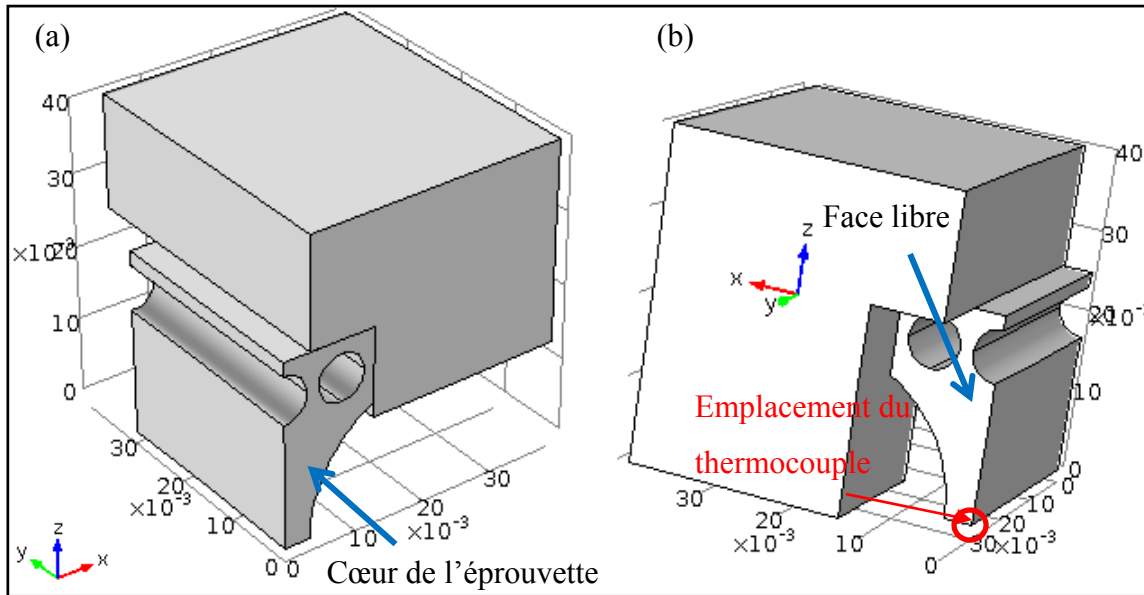


Figure 4.1 Géométrie utilisée dans le logiciel COMSOL, centre du montage (a) et faces libres (b)

Concernant le thermocouple, sa position est définie sur la face libre de l'éprouvette modélisée, sur la ligne de symétrie. Le nœud mis en évidence sur la Figure 4.1 est celui choisi pour représenter le thermocouple. Le perçage existant en réalité de 1 mm de diamètre n'est pas représenté, pour simplifier le modèle.

#### 4.1.2 Propriétés des matériaux

Deux matériaux sont introduits dans la simulation : l'alliage d'aluminium A356 et l'acier 1020. Pour définir ces matériaux, la bibliothèque de matériaux présente dans le logiciel est utilisée. A partir des définitions de « acier standard » et « alliage d'aluminium », les valeurs des propriétés physiques et mécaniques sont modifiées pour correspondre au mieux avec les matériaux du projet (Tableau 4.1). Les matériaux sont ensuite assignés aux pièces correspondantes : acier pour le cadre et alliage d'aluminium pour l'éprouvette.

Tableau 4.1 Propriétés des matériaux utilisés dans la simulation numérique

	<b>Acier</b>	<b>Aluminium</b>
<b>Module d'Young E (GPa)</b>	190	72,4 à 20 °C, 45 à 280 °C
<b>Limite d'élasticité (MPa)</b>	345	280
<b>Densité (kg/m<sup>3</sup>)</b>	7870	2685
<b>Coefficient de dilatation thermique entre 20 °C et 300 °C (/°C)</b>	$11,5 \cdot 10^{-6}$	$23,5 \cdot 10^{-6}$
<b>Coefficient de Poisson</b>	0,29	0,33
<b>Chaleur spécifique (J/kg.K)</b>	520	875
<b>Conductivité thermique (W/m.K)</b>	51,9	155 à 0 °C, 175 à 200 °C

#### 4.1.3 Définition des contacts

Avec la géométrie telle que créée, les contacts géométriques et thermiques latéraux entre l'éprouvette et le cadre se font automatiquement. En effet, les géométries créées ne laissent pas de jeu à cet endroit. Par contre, le contact thermique supérieur n'existe pas par défaut, du fait du jeu géométrique introduit, donc les transferts de chaleur par conduction sont inexistantes entre les deux surfaces. Le contact thermique est ajouté manuellement au modèle pour forcer la conduction entre le cadre et l'éprouvette.

#### 4.2 Conditions thermiques et mécaniques

Pour rendre le modèle réaliste et respecter les conditions de symétries utilisées dans la création de la géométrie, des conditions thermiques et mécaniques doivent être ajoutées au montage.

#### 4.2.1 Conditions thermiques

Pour la partie thermique de l'étude, il faut définir des pertes liées à la convection et au rayonnement (Tableau 4.2). Ces conditions seront les mêmes pour les étapes de chauffage et de maintien. Le montage étant installé dans une pièce avec une température ambiante moyenne de 20°C, cette température est choisie comme référence dans toute l'étude.

Tableau 4.2 Conditions de rayonnement et convection

	<b>Température ambiante</b>	<b>Coefficient</b>	<b>Nombre de faces concernées</b>
<b>Rayonnement avec l'ambiante</b>	20 °C	0,7	10
<b>Débit de chaleur</b>	20 °C	0 W	6
<b>Convection</b>	20 °C	$2,5 \cdot 10^{-5}$ W/mm <sup>2</sup> K	10

Le coefficient de 0,7 de rayonnement correspond à une valeur standard utilisée pour un corps gris, tandis que le coefficient de convection de  $2,5 \cdot 10^{-5}$  W/mm<sup>2</sup>K appliqué est celui d'une convection naturelle. Les débits de chaleur sont appliqués aux faces du cadre et de l'éprouvette qui sont sur les plans de symétries utilisés pour réduire la géométrie.

En plus de ces conditions qui seront les mêmes pendant les deux étapes de la simulation, un flux de chaleur est appliqué pour représenter le chauffage par cartouche chauffante. La puissance de chaque cartouche réelle est de 300 Watts. Seulement, dans cette simulation, la longueur de l'éprouvette est réduite de moitié donc la puissance doit également être divisée par deux. 150 Watts sont donc appliqués sur les surfaces de l'emplacement des cartouches chauffantes.

#### 4.2.2 Conditions mécaniques

Pour la partie mécanique, seules les conditions de symétries sont à renseigner (Figure 4.2). Ces conditions se traduisent par l'application de conditions de type appui plan permettant de bloquer les déplacements dans différentes directions.

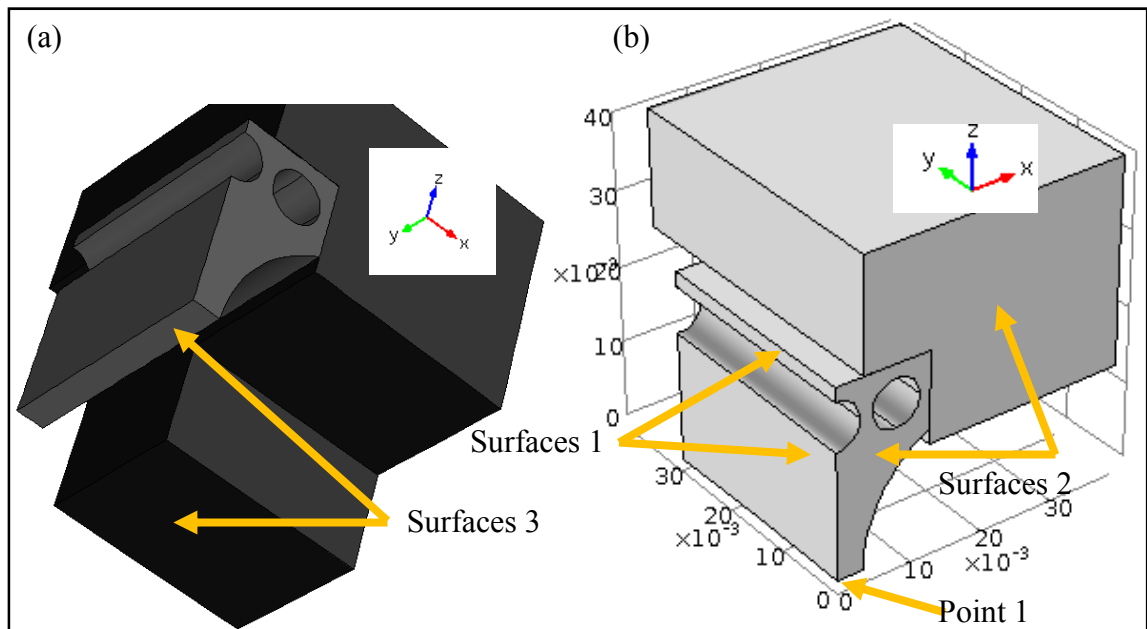


Figure 4.2 Définition des surfaces de symétries, normales à la direction Z (a) et normales aux directions X et Y (b)

Pour respecter les symétries utilisées pour la définition de la géométrie, il est nécessaire de bloquer des déplacements dans plusieurs directions (Tableau 4.3).

Tableau 4.3 Conditions aux limites appliquées

Position	Déplacement Bloqué
Point 1	Support fixe
Surfaces 1	Direction x
Surfaces 2	Direction y
Surfaces 3	Direction z

Avec les conditions telles que définies ci-dessus, le modèle est suffisamment contraint pour obtenir des résultats cohérents.

### 4.3 Maillage et convergence

Le logiciel COMSOL propose plusieurs types de maillages allant de « extrêmement grossier » à « extrêmement fin ». Il est possible de mailler différemment le cadre et l'éprouvette, ce qui offre une grande possibilité de maillages. Pour cette étude, cinq types de maillages sont testés avec des raffinements différents. (Figure 4.3). Quel que soit le raffinement du maillage, les éléments utilisés sont des éléments tétraédriques, aussi bien pour l'éprouvette que pour le cadre. Pour tous les maillages testés, un maillage plus fin est appliqué pour l'éprouvette par rapport à celui utilisé pour le cadre car on s'intéresse uniquement au comportement de l'éprouvette.

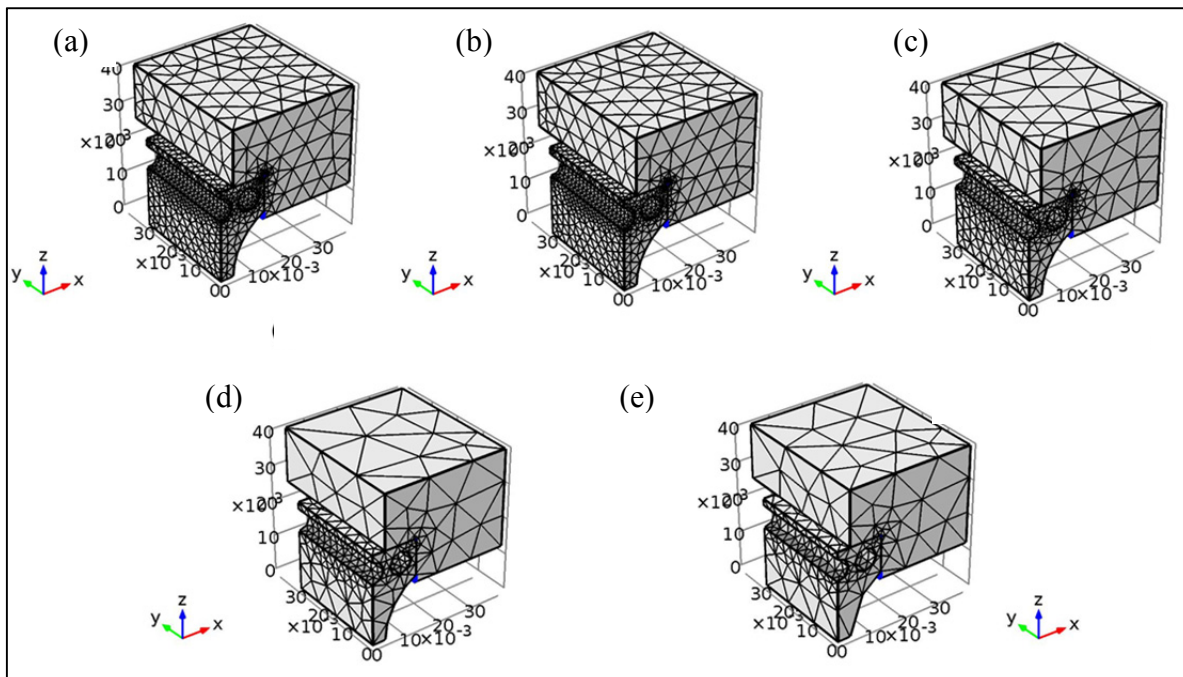


Figure 4.3 Différents maillages testés, du plus fin (a) au plus grossier (e)



Les maillages ont les caractéristiques suivantes (Tableau 4.4) :

Tableau 4.4 Comparaison des différents maillages

Maillage	Nombre d'éléments	Nombre de degrés de liberté
1	57407	266570
2	9906	50403
3	5362	28566
4	2389	13484
5	1875	10559

Pour étudier la convergence des maillages, la position du nœud présentant le plus grand déplacement pour le maillage 1 (Figure 4.3, a) est identifiée. Il s'agit du nœud positionné dans le coin extérieur du cadre (Figure 4.4).

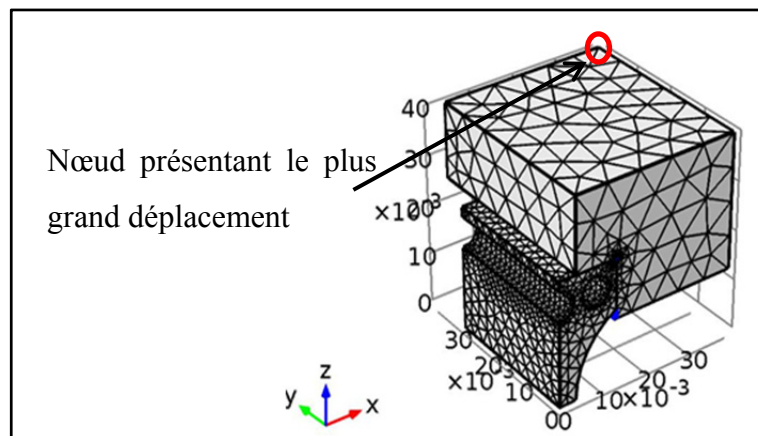


Figure 4.4 Position du nœud avec le plus grand déplacement

Ensuite, les valeurs de déplacement à ce même nœud pour les différents maillages sont relevées et comparées entre elles. La Figure 4.5 présente l'erreur relative sur le déplacement maximal relevé pour les maillages 2 à 5.

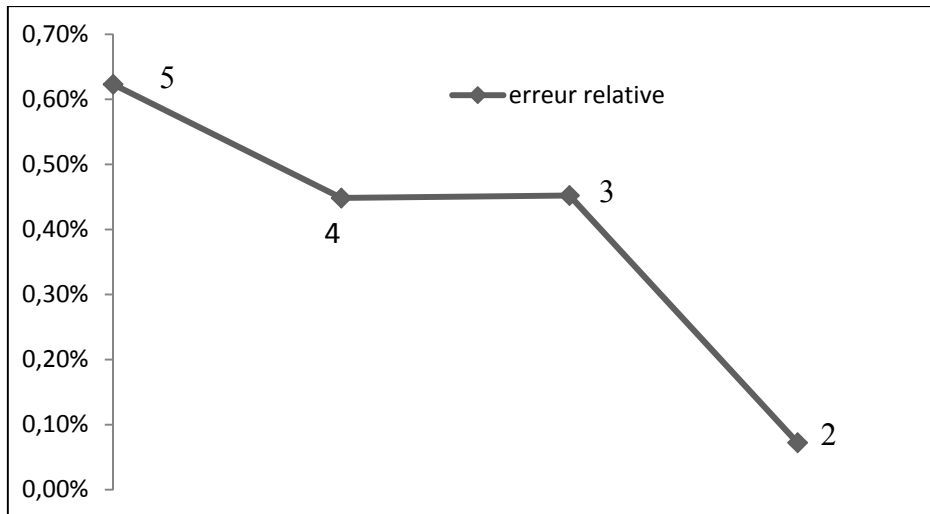


Figure 4.5 Représentation de l'erreur relative des déplacements maximum au nœud identifié pour les maillages 2 à 5 par rapport au maillage le plus fin

Les erreurs relatives des maillages 3, 4 et 5 sont comprises entre 0,45 % et 0,62 % alors que pour le maillage 2, l'erreur est de 0,1 %. La suite de l'étude sera donc réalisée avec le maillage 2 car la précision est très bonne et le temps de calcul inférieur à celui du maillage 1.

#### 4.4 Résultats

La simulation numérique est réalisée en deux étapes : une première étape est réalisée pour simuler la phase de chauffage et une seconde pour simuler la phase de maintien à chaud. Pour la première étape, l'objectif est de passer de 50 °C à 300 °C. Pour ce faire, la simulation est lancée pour 330 secondes, temps typique de chauffage. Pour la deuxième étape, la simulation est lancée sur 30 secondes, à partir de l'état de la chauffe donnant une température de 300 °C au niveau du thermocouple.

## 4.4.1 Température

### 4.4.1.1 Chauffage

Pour la première étape de cette simulation numérique, l'objectif est de vérifier que les données thermiques appliquées au modèle sont justes. Pour cela, on s'intéresse au temps de chauffe nécessaire pour atteindre 300 °C au thermocouple. La Figure 4.6 donne l'évolution de la température dans le temps lors de la phase de chauffage.

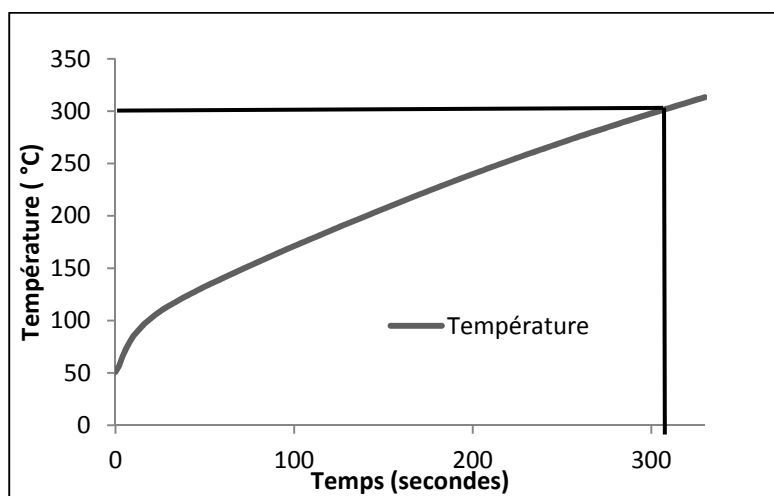


Figure 4.6 Évolution de la température pendant 330 secondes de chauffe

De cette façon, le temps total pour passer de 50 °C à 300 °C est de 306 secondes. Le chauffage simulé est plus rapide d'une vingtaine de secondes que le temps moyen expérimental mais ce résultat reste cohérent. Les conditions appliquées sont donc validées. Le temps de 306 secondes correspondra alors pour cette étude au temps de fin de chauffe et de début de maintien. Les températures dans le montage à cet instant sont présentées sur la Figure 4.7.

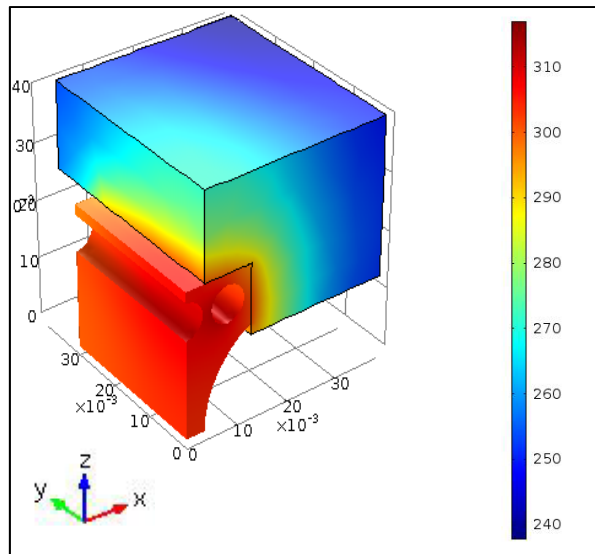


Figure 4.7 Température (en °C) après 306 secondes de chauffe

L'éprouvette n'a pas une température homogène, mais elle est comprise entre 300 °C et 315 °C pour les parties en contact avec la cartouche chauffante. Concernant le cadre, sa température est comprise entre 225 °C et 290 °C.

#### 4.4.1.2 Maintien à 300 °C

La phase de maintien est lancée à partir de l'étape correspondant à 306 secondes de chauffage. Pour maintenir la température constante au thermocouple, il est nécessaire d'adapter la puissance des cartouches chauffantes. Pour le montage expérimental, la puissance est adaptée à chaque pas de temps en fonction de la température au thermocouple. En moyenne, la puissance utilisée pendant la phase de maintien est de 80 % de la puissance totale soit 240 Watts.

Pour la simulation, il est décidé de laisser la puissance constante pendant toute la phase de maintien afin de faciliter la modélisation. Afin de trouver la puissance adéquate permettant de maintenir 300 °C au thermocouple pendant les 30 secondes de maintien, la simulation est lancée avec plusieurs valeurs de puissance possibles. Les différents cas sont présentés sur la

Figure 4.8. La baisse de puissance entraîne une baisse de la température allant de 10 degrés pour la puissance la plus faible (66 %) à un degré pour la puissance de 130 Watts (87 %). Les puissances plus élevées maintiennent la température autour de 300 °C mais entraînent une augmentation continue de la température. Le choix s'oriente vers la puissance de 115 Watts (77 %) car le comportement obtenu avec cette puissance est celui qui représente le mieux l'état après 30 secondes de maintien. En effet, la température de 300 ° n'est pas dépassée et la variation de température est au maximum de 5 °C.

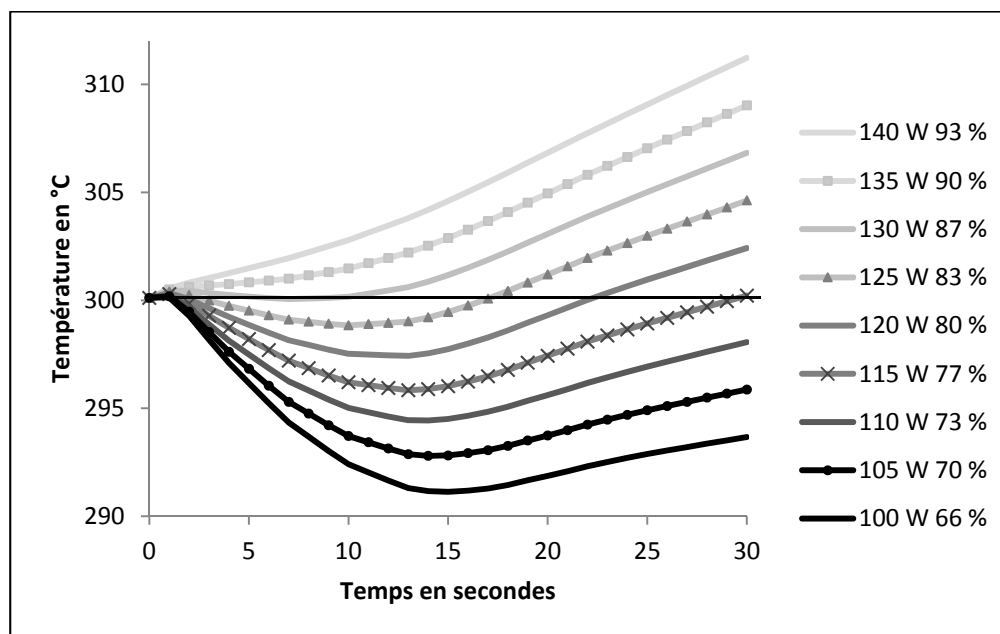


Figure 4.8 Évolution de la température pendant 30 secondes de maintien en fonction de la puissance appliquée

Avec la puissance de 115 Watts choisie, la température en fin de maintien obtenue dans le montage est présentée dans la Figure 4.9.

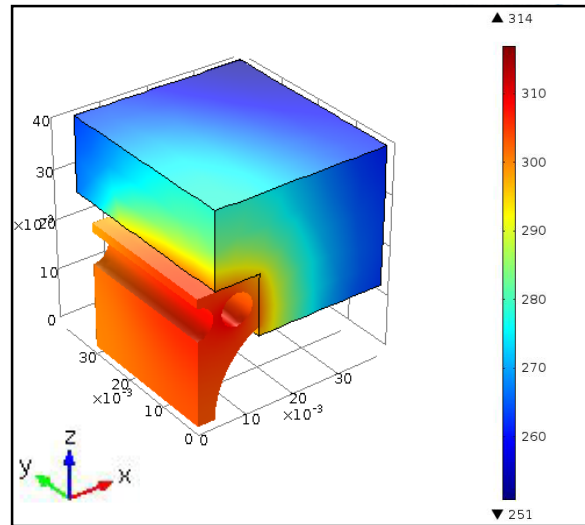


Figure 4.9 Température (en °C) dans le modèle après 30 secondes de maintien

La répartition de température dans l'éprouvette est sensiblement identique à celle obtenue en fin de chauffe (de 300 °C à 315 °C) mais le cadre est plus chaud en fin de maintien qu'en fin de chauffage (température minimale plus élevée de 25 °C). La température n'est donc pas homogène dans la pièce à la fin de la phase de maintien, comme le confirme la Figure 4.10.

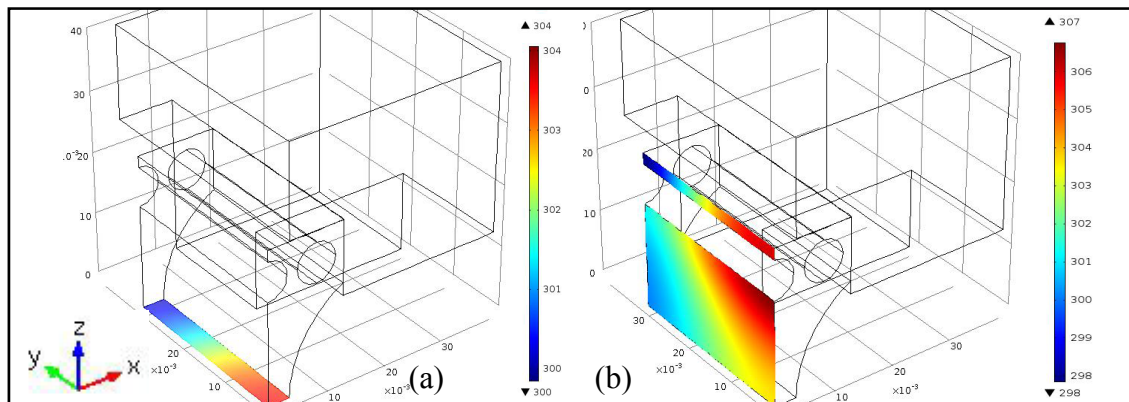


Figure 4.10 Températures (en °C) après 30 secondes de maintien au centre de l'éprouvette (a) dans le plan XY horizontal et (b) dans le plan YZ vertical

Dans le plan horizontal, la variation de température est de 4 degrés entre la surface et le centre de l'éprouvette, alors que dans le plan vertical, la différence est de 9 degrés.

#### 4.4.2 Déformations

Après s'être intéressé à la température en fin de chauffe et en fin de maintien, les déformations sont maintenant étudiées. Expérimentalement, les déformations sont obtenues sur la surface de l'éprouvette se trouvant face à la caméra et la zone analysée est le centre de cette surface. Pour l'étude numérique, les déformations sont données pour différentes arêtes de la géométrie et sont toutes données dans la direction de l'axe Z, axe vertical. De cette façon, il est possible de comparer déformations expérimentales et numériques mais aussi d'avoir des résultats plus complets que lors de l'étude expérimentale.

Pour commencer, les déformations totales (mécaniques et thermiques) et les déformations élastiques sont données sur l'arête centrale de l'éprouvette, allant du cœur de l'éprouvette à la surface (Figure 4.11).

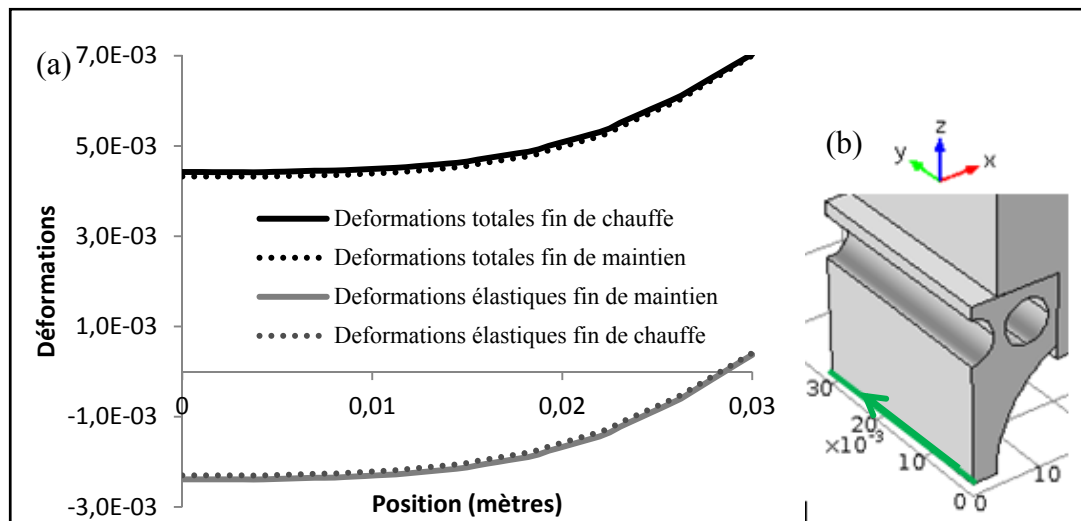


Figure 4.11 Déformations  $\varepsilon_{zz}$  totales et mécaniques (a) et localisation des déformations (b), en fin de chauffe et en fin de maintien

La différence de déformations entre la fin de la chauffe et la fin du maintien est négligeable. Ensuite, on remarque que les déformations ne sont pas égales dans toute l'éprouvette. En surface ( $\varepsilon_{\text{tot}}=7 \cdot 10^{-3}$  pour la position  $y=0,03$  m), la déformation totale obtenue est cohérente avec les résultats obtenus expérimentalement. En effet, les déformations enregistrées sur les

premiers cycles de chaque éprouvette étaient comprises entre  $6,5 \cdot 10^{-3}$  et  $7,5 \cdot 10^{-3}$  (Figure 3.8, Figure 3.9 et Figure 3.10). Les déformations mécaniques montrent que si le cœur de l'éprouvette est en compression, la surface est sollicitée en tension très faiblement.

Pour comparer les comportements en surface et au cœur de l'éprouvette, la Figure 4.12 présente les déformations élastiques sur les arêtes centrales des faces de la géométrie. Comme précédemment, les déformations en fin de chauffe et en fin de maintien sont similaires, mais une différence plus importante existe pour les déformations au centre de l'éprouvette (de l'ordre de  $1 \cdot 10^{-4}$ , soit 10 % d'écart). Les déformations au centre de l'éprouvette montrent que l'éprouvette est en compression alors que celles à la surface visible montrent que la face est en tension. La tension est la même pour toute la face, alors que la compression est plus importante au cœur de l'éprouvette que vers la face courbe.

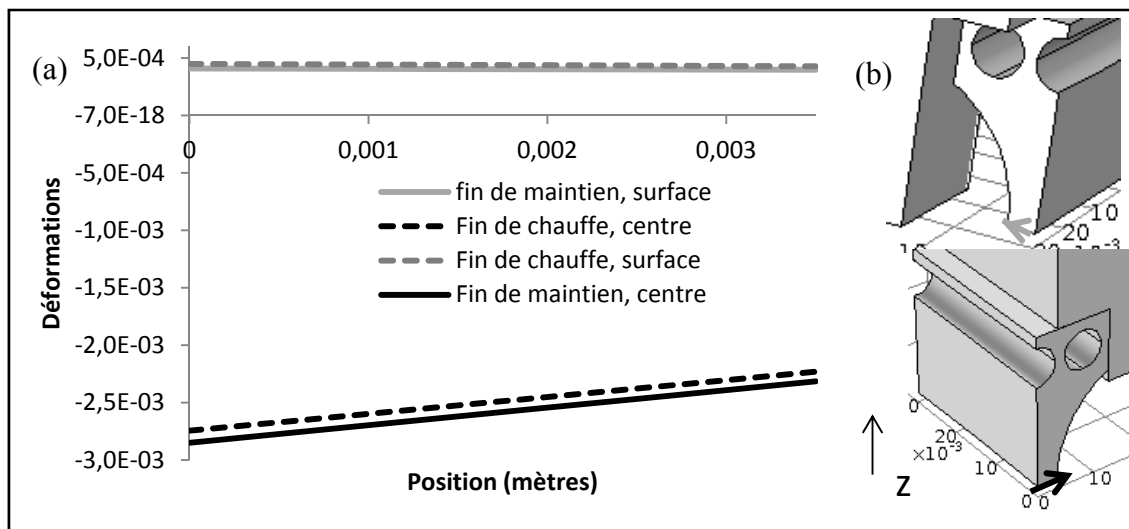


Figure 4.12 Déformations élastiques  $\varepsilon_{zz}$  (a) et localisation des déformations (b), en fin de chauffe et en fin de maintien

Les déformations obtenues sur la face de l'éprouvette, sont cohérentes avec les résultats expérimentaux obtenus avec le coefficient de dilatation  $\alpha=23,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  (Figure 3.11) pour l'éprouvette 2 (vieillie, avec molybdène).



Les déformations au cœur de l'éprouvette ne sont pas constantes sur la ligne, on s'intéresse alors aux déformations en surface de l'éprouvette, sur la face courbée.

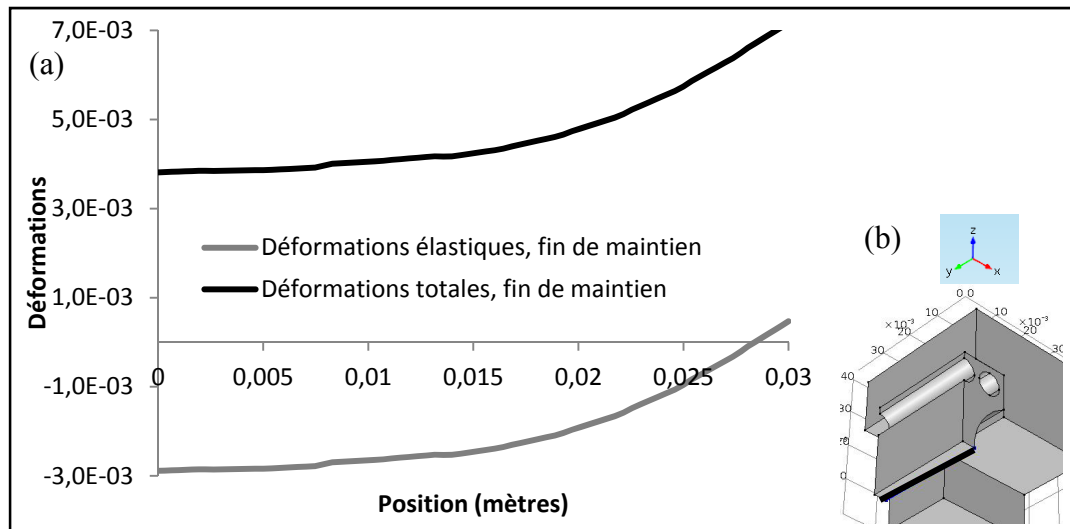


Figure 4.13 Déformations  $\epsilon_{zz}$  totales et mécaniques (a) et localisation des déformations (b), en fin de chauffe et en fin de maintien

La Figure 4.13 présente les déformations totales et élastiques sur la longueur de l'éprouvette, mais cette fois-ci en surface. Les courbes ont la même allure que sur la Figure 4.11, mais les valeurs des déformations totales entre 0 et 15 mm sont plus faibles et les déformations élastiques plus élevées en valeur absolue. Les déformations élastiques sont également plus importantes que celles obtenues sur la Figure 4.12. De cette façon, il serait intéressant de suivre les déformations expérimentales sur cette face car elles sont plus importantes.

Les déformations obtenues en compression étant de l'ordre de  $3 \cdot 10^{-3}$  à chaud, se pose la question de la plasticité dans l'éprouvette. Pour savoir si l'éprouvette plastifie ou non, les contraintes de Von Mises sont analysées.

#### 4.4.3 Contraintes de Von Mises et normales

Les contraintes de Von Mises  $\sigma_{VM}$  sont définies par l'équation suivante :

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4.1)$$

où  $\sigma_i$  représentent les contraintes principales. Si la valeur de la contrainte de Von Mises est supérieure à la contrainte d'écoulement  $\sigma_{y0,2\%}$ , alors il y a plasticité. La Figure 4.14 présente ces contraintes dans l'ensemble du montage.

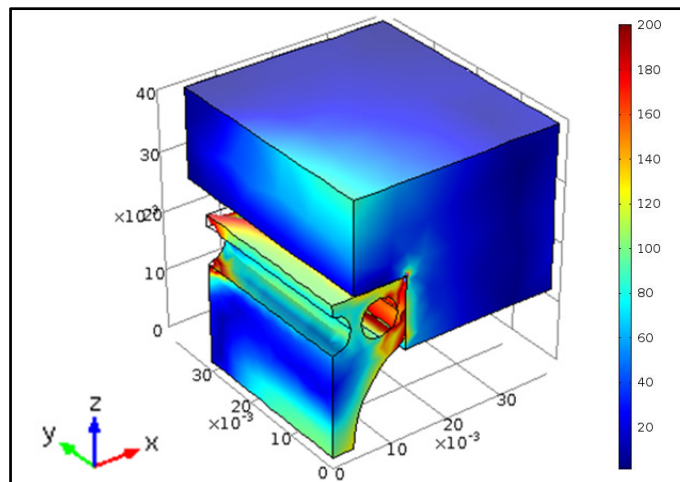


Figure 4.14 Contraintes de Von Mises (en MPa) dans le montage en fin de maintien

Les contraintes vont de 1 MPa à 200 MPa, obtenus au niveau des perçages de l'éprouvette. Pour l'alliage A356 d'aluminium, la limite d'écoulement à 280 °C est de 80 MPa (Angeloni, 2011).

Afin de localiser la plasticité, les contraintes sont données sur la longueur de l'éprouvette au centre et en surface sur la Figure 4.15.

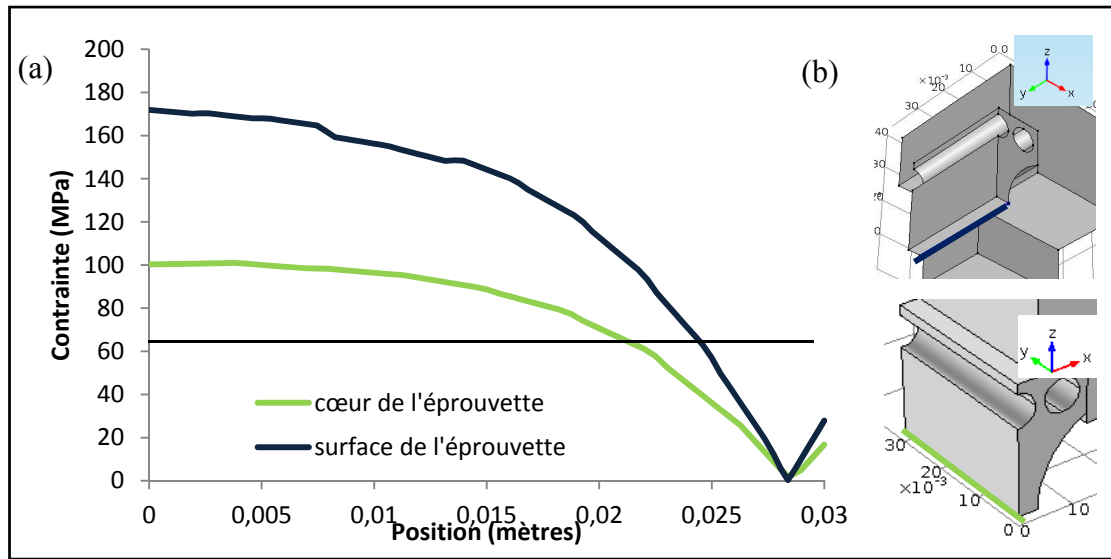


Figure 4.15 Contraintes de Von Mises sur la longueur (a) et localisation des contraintes (b), en fin de maintien

Pour la ligne au centre de l'éprouvette, les contraintes de Von Mises sont supérieures à 80 MPa de 0 mm à 18 mm donc il y a des déformations plastiques pour les deux tiers de l'éprouvette. En surface, les contraintes de Von Mises sont supérieures à celles au centre et 80 MPa sont obtenus pour 23 mm donc les déformations sont plastiques pour les trois quarts de l'éprouvette, en partant du cœur de l'éprouvette pour aller jusqu'à la face.

Cette plasticité au centre de l'éprouvette et non sur la face peut s'expliquer par les gradients de température présents dans la pièce. Cependant, les contraintes dans les trois directions X, Y et Z sont présentées la Figure 4.16 afin de regarder s'il n'y a pas un effet conjugué des contraintes aboutissant à la plasticité.

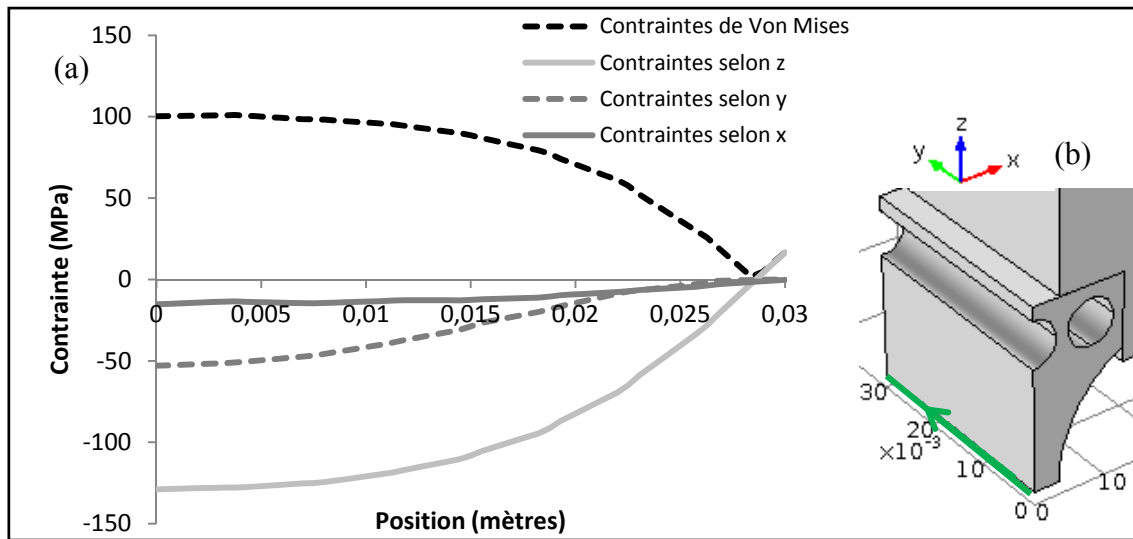


Figure 4.16 Contraintes de Von Mises et principales dans les directions X, Y et Z (a) et localisation des contraintes (b) en fin de maintien

Les contraintes dans les directions Y et X sont nulles à la surface de l'éprouvette (0,03 m) donc la contrainte selon Z correspond à la contrainte de Von Mises. Dans le reste de l'éprouvette, les contraintes en X et Y sont faibles par rapport à la contrainte en Z mais elles sont toutes négatives et diminuent (en valeur absolue) lorsque l'on se rapproche de la surface. La différence entre la contrainte en Z et les contraintes de Von Mises est donc plus importante au centre de l'éprouvette du fait des contraintes en X et Y. Cette différence tend à s'annuler avec la diminution des contraintes en X et Y.

#### 4.4.4 Effet des jeux

Toute la simulation a été faite avec un jeu géométrique de 0,065 mm en hauteur entre le cadre et l'éprouvette. Afin d'étudier l'influence du jeu sur les déformations et la plasticité de l'éprouvette, une étude est faite avec un jeu nul et une autre avec un jeu de 0,1 mm.

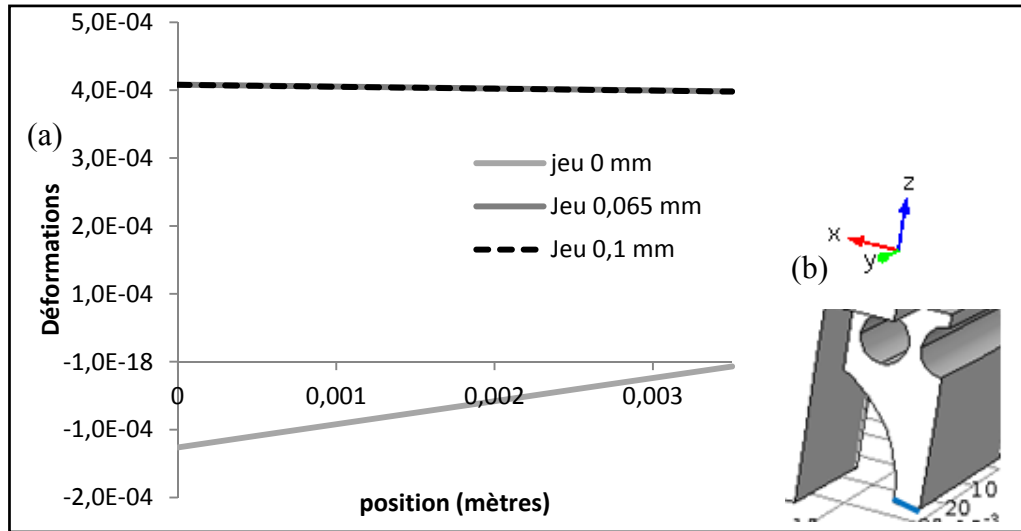


Figure 4.17 Déformations élastiques  $\varepsilon_{zz}$  (a) et localisation des déformations (b), en fin de maintien

La Figure 4.17 présente les déformations élastiques en surface en fonction du jeu. Avec un jeu de 0,065 mm, l'éprouvette était sollicitée en tension. Pour un jeu nul, l'éprouvette est cette fois sollicitée en compression. En revanche, le comportement est le même pour un jeu de 0,1 mm que pour un jeu de 0,065 mm.

Pour connaître la plasticité dans l'éprouvette, les contraintes de Von Mises en fin de maintien sont comparées sur la Figure 4.18.

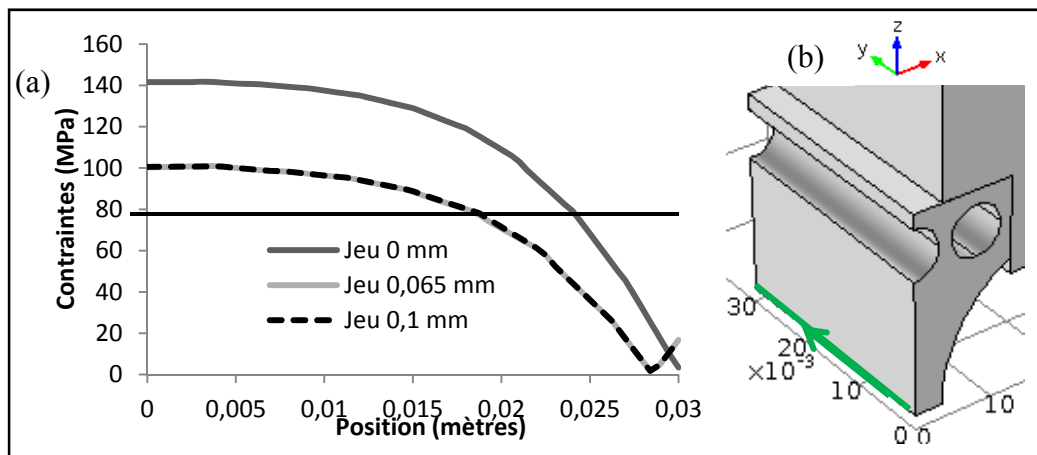


Figure 4.18 Contraintes de Von Mises (a) et localisation des contraintes (b) en fin de maintien

De la même façon que pour les déformations, le comportement est le même pour un jeu de 0,065 mm que pour un jeu de 0,1 mm. Par contre, lorsque le jeu est nul, les contraintes de Von Mises sont supérieures. Elles dépassent la limite d'écoulement entre 0 et 25 mm contre 18 mm pour un jeu de 0,1 mm. Cela signifie que plus de déformations plastiques sont développées lorsque le jeu est nul.

#### **4.5 Bilan de la simulation numérique**

Dans ce chapitre, une simulation numérique était réalisée afin de connaître les sollicitations développées dans le montage. L'étude de la température montre que lors de la phase du maintien, il n'y a pas homogénéisation de la température dans l'éprouvette. Ceci est dû à la puissance maintenue dans les cartouches chauffantes pour maintenir la température de 300 °C au thermocouple.

Les déformations obtenues dans cette simulation sont cohérentes avec celles obtenues de façon expérimentale. De plus, il a été montré que le cœur de l'éprouvette est en compression alors que la surface est en tension pour un jeu de 0,065 mm. En revanche, si le jeu est nul, toute l'éprouvette est en compression.

Enfin, l'étude des contraintes de Von Mises a montré que l'éprouvette plastifie, seulement au centre et non en surface. Pour un jeu nul, des déformations plastiques sont développées sur 25 mm de long alors que pour un jeu de 0,065 mm, elles sont plastiques sur 18 mm à partir du centre de l'éprouvette. La compression plastique à chaud est cohérente avec le comportement des culasses décrit dans la littérature (Thalmair et al., 2006) : la culasse est en compression à chaud et en tension lors des phases de refroidissement, ce qui engendre l'apparition de fissures.

## CONCLUSION

L'utilisation de l'alliage A356 en remplacement de la fonte pour les culasses de moteur Diesel exige la connaissance du comportement du matériau dans les conditions moteur pour limiter l'apparition de fissures entraînant la ruine de la pièce. Ce mémoire avait alors pour but de mettre en place une méthode de test simple permettant d'évaluer la durée de vie des pièces sollicitées en fatigue thermique avec fluage à haute température.

Pour y parvenir, un banc d'essai comprenant cadre, éprouvettes, systèmes de chauffage, de refroidissement et de contrôle de la température a été créé. Il a aussi été mis en place un système de suivi de déplacement par caméra pour faire de la corrélation d'images et ainsi connaître les déformations développées dans les éprouvettes. Des tests expérimentaux ont été menés et une simulation numérique a aussi été effectuée pour comprendre le comportement du montage.

Les résultats expérimentaux ont montré qu'avec la configuration de banc d'essai choisie, les déformations enregistrées en surface étaient faibles mais des différences ont été mises en évidence en fonction de la composition et des traitements thermiques des éprouvettes. L'utilisation de la corrélation d'images pour connaître les déformations à 300 °C a été validée par la comparaison des évolutions de la température et des déformations dans le temps : les variations de température n'altèrent pas la précision de la méthode.

La simulation numérique de la phase de chauffage et du maintien à haute température a permis de déterminer les contraintes dans les éprouvettes et de repérer les zones de l'éprouvette où les déformations mécaniques sont plus importantes. Les faces suivies expérimentalement sont les faces où les déformations sont les plus faibles, le maximum étant trouvé au centre de l'éprouvette. L'effet du jeu a aussi été étudié et il a été montré que pour un jeu nul, l'éprouvette est subit des déformations plastiques sur les trois quart de sa longueur alors que pour un jeu positif de 0,065mm, seules les deux tiers de la longueur sont plastifiées.





## RECOMMANDATIONS

Lors de ce projet, plusieurs points source d'améliorations ont été relevés et ce pour toutes les parties du travail.

Concernant le montage expérimental, plusieurs choses sont à revoir. Tout d'abord, pour le refroidissement du montage, le compresseur d'air comprimé n'est pas capable de fournir tout l'air demandé pour des essais de plus de 24 heures, donc la solution de refroidissement est à changer. Un souffleur est la nouvelle solution proposée pour le refroidissement.

Pour l'acquisition des données, la synchronisation de la caméra avec le programme LabView contrôlant la température permettrait de gagner du temps lors du dépouillement des résultats. De plus, il serait intéressant de pouvoir prendre des images à une température donnée plutôt que de la piloter par un intervalle de temps entre chaque prise : cela permettrait de réduire le nombre de données pour chaque test si l'on veut uniquement étudier les déformations à une température choisie. Enfin, la création d'un programme permettant le tri des photos de façon automatique ferait gagner du temps lors de la préparation de la corrélation d'images.

Afin d'améliorer l'exploitation des résultats, il est nécessaire de connaître le coefficient de dilatation de l'alliage utilisé. Cette information permettra une meilleure précision lors de l'analyse des déformations mécaniques.

Pour les essais mécaniques, quatre éprouvettes sont encore disponibles. Des tests supplémentaires peuvent donc être réalisés. Le comportement des éprouvettes non vieilles devra être confirmé car une seule éprouvette non vieillie a été testée. Les tests avec variations du temps de maintien devront être effectués.

Aucune analyse de microstructure des échantillons après test n'a été faite dans ce projet. Il serait intéressant de faire des observations pour mieux comprendre les comportements observés. Cette analyse sera essentielle pour les tests avec différents temps de maintien pour

connaître les évolutions de la microstructure en fonction de la durée de maintien à haute température.

Enfin, la simulation numérique a montré que les déformations mécaniques au centre de l'éprouvette sont plus importantes que sur la face suivie expérimentalement. Il paraît alors nécessaire de revoir la position de la caméra par rapport à l'éprouvette pour suivre les déformations au plus proche du centre. Il a été montré que le center de la face courbée subit des déformations du même ordre que celles au centre donc il faudrait suivre les déformations à cet endroit.

Cependant, la simulation numérique réalisée dans ce projet ne comprend pas de modèle plastique. Sans ce modèle, il n'est pas possible de quantifier l'accumulation de déformations au cours des cycles. L'implantation d'un tel modèle est donc essentielle pour pouvoir aboutir à un modèle complet de simulation des cycles thermiques et mécaniques des culasses de moteur diesel en aluminium.

## ANNEXE I

### PLAN DES ÉLÉMENTS DU MONTAGE TELS QU'USINÉS

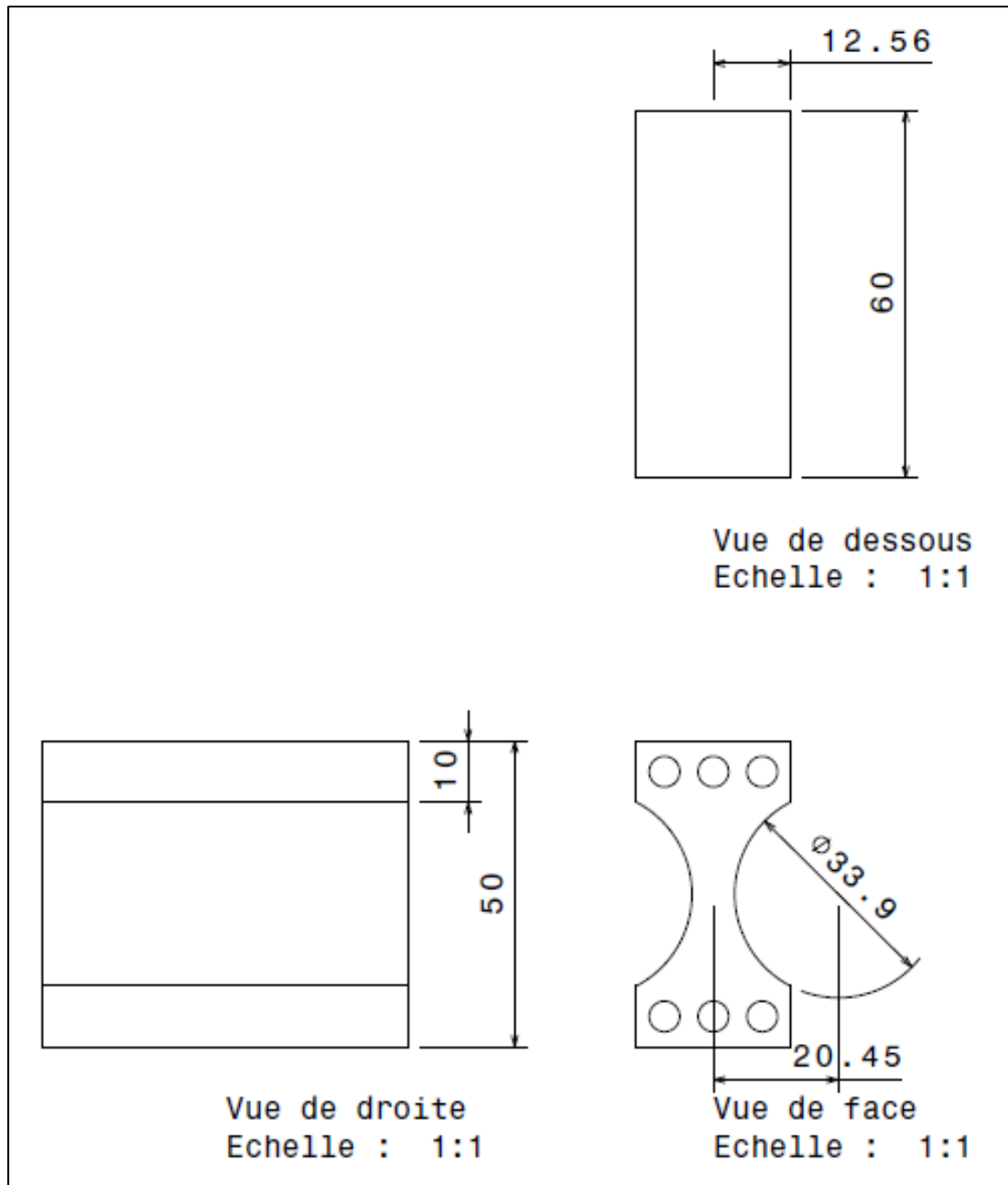


Figure-A I-1 Plan des éprouvettes. Toutes les dimensions sont données en mm

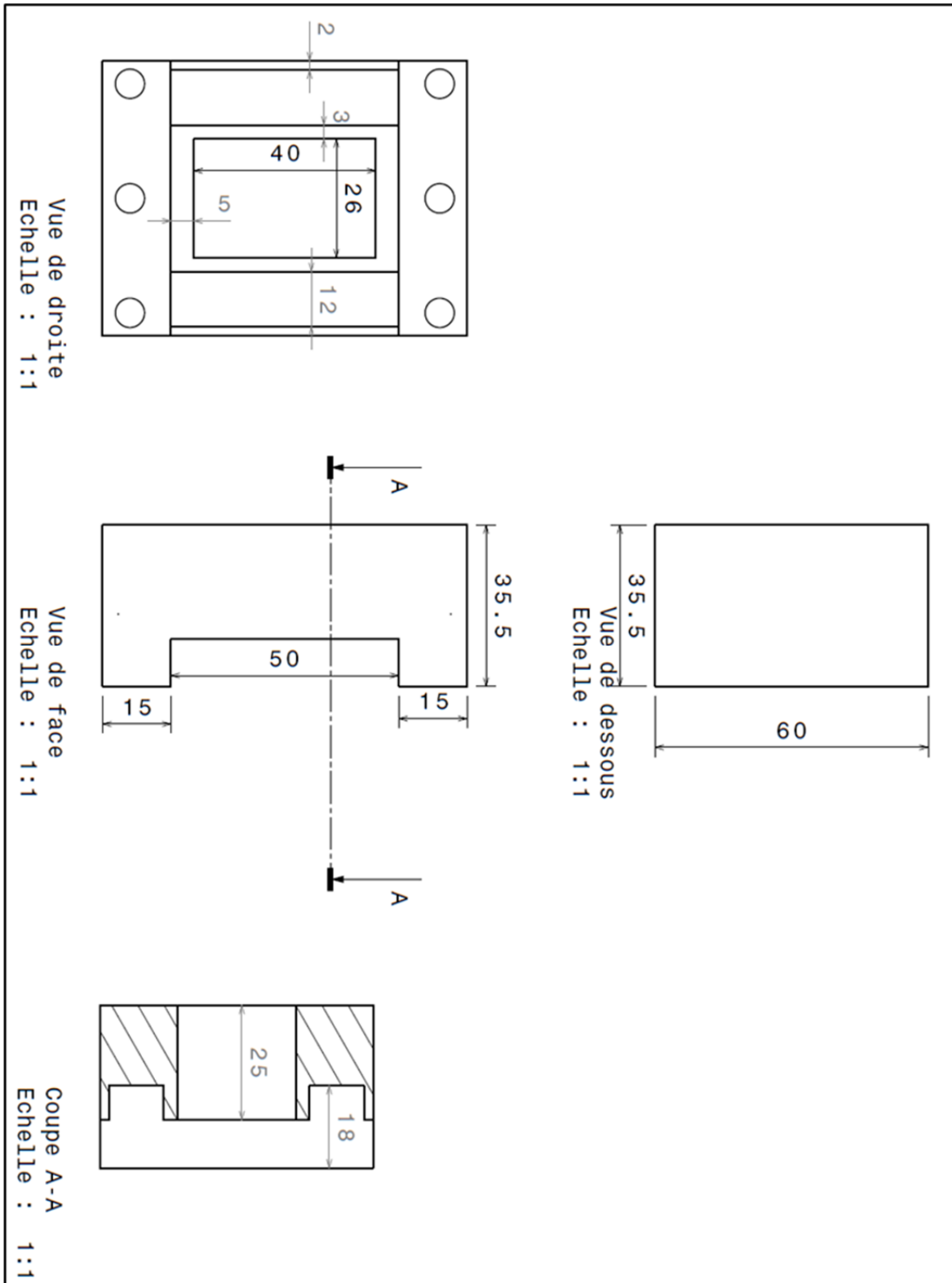


Figure-A I-2 Plan d'une partie de cadre. Toutes les dimensions sont données en mm

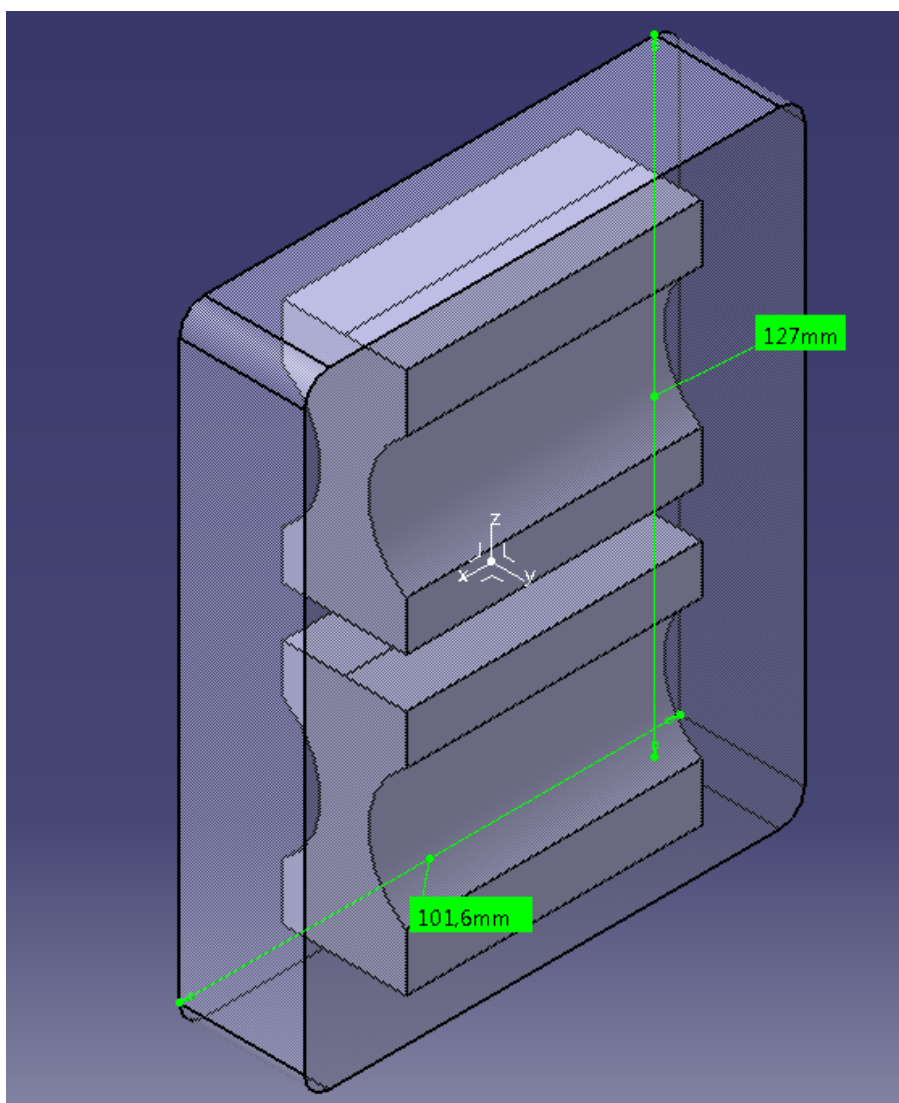


Figure-A I-3 Usinage des éprouvettes dans une plaque d'alliage coulée



## ANNEXE II

### COMPOSITION EXACTE DES PLAQUES COULÉES À L'UNIVERSITÉ MCGILL

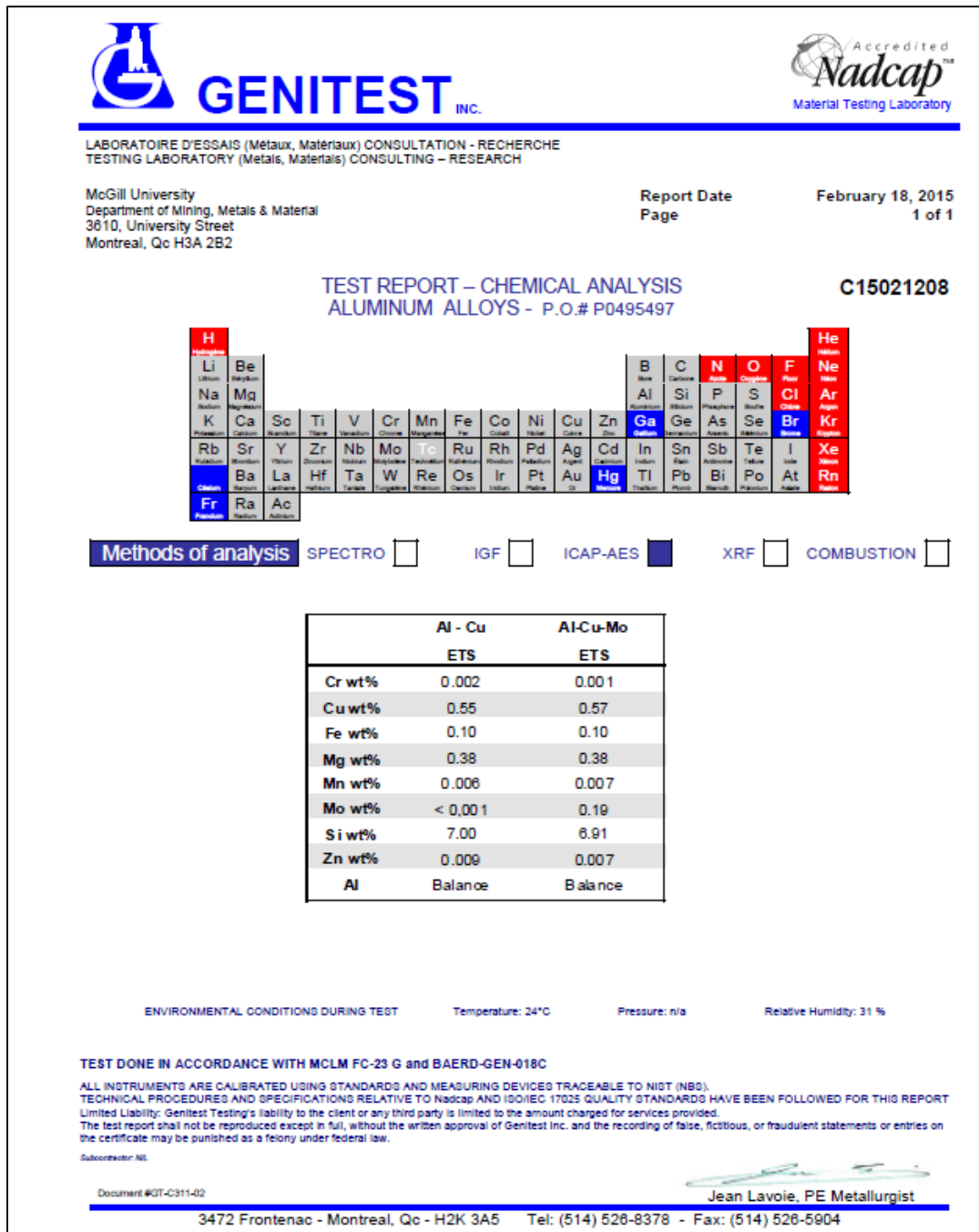


Figure-A II-1 Composition des plaques non modifiées au Strontium





## ANNEXE III

### PROGRAMME LABVIEW CONTRÔLANT LES CYCLES DE TEMPÉRATURE

Afin de contrôler la température, un programme LabView a été créé pour ce projet. Cette annexe présente la face avant ainsi que le diagramme du programme.

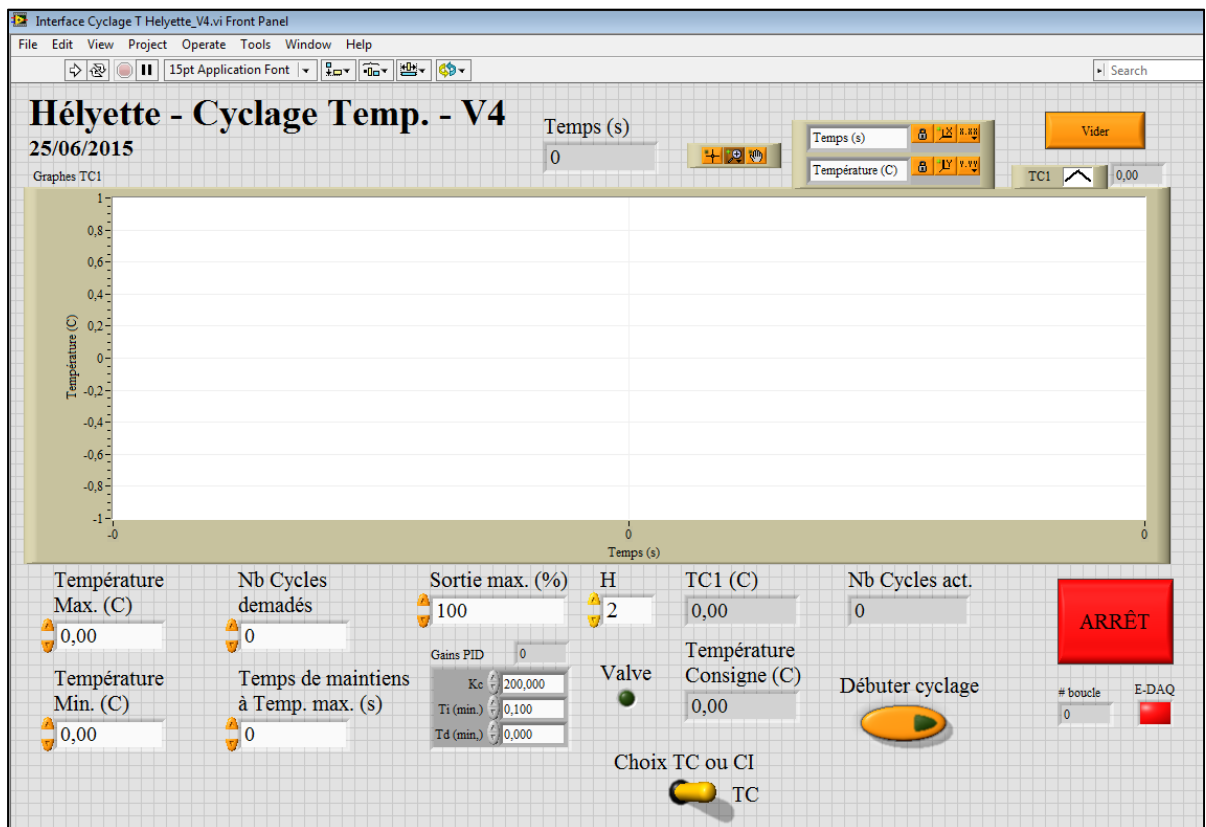


Figure-A III-1 Face avant du programme LabView utilisé pour le contrôle de la température

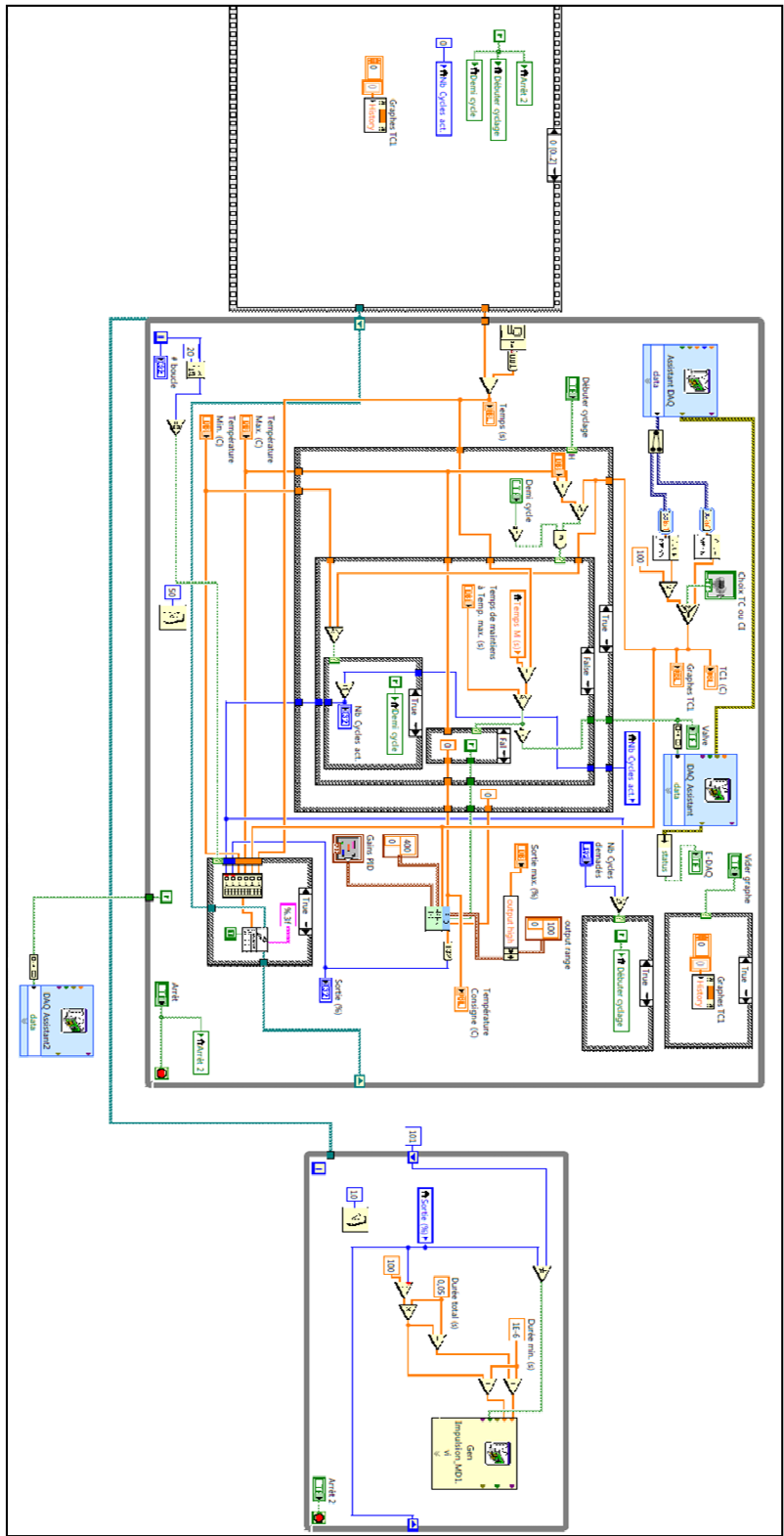


Figure-A III-2 Diagramme du programme LabView utilisé pour le contrôle de la température

## ANNEXE IV

### ANALYSE D'IMAGES : COMMENT IDENTIFIER LES PHOTOS DONNANT DES ERREURS

Les images prises par la caméra lors des tests ne sont pas toutes correctes pour être exploitées. En effet, certaines sont floues pour diverses raisons : chaleur émise par les éléments, caméra qui bouge légèrement, vibrations proches du montage...

Pour identifier rapidement les images qui peuvent poser problème lors de l'analyse, il faut ouvrir toutes les images dans le logiciel Fiji en « image sequence ». A partir de cette séquence, il faut tracer un profil en z, soit profil dans le temps : sur la zone sélectionnée, le logiciel moyenne les niveaux de gris et attribue une valeur par image (Figure-A IV-1).

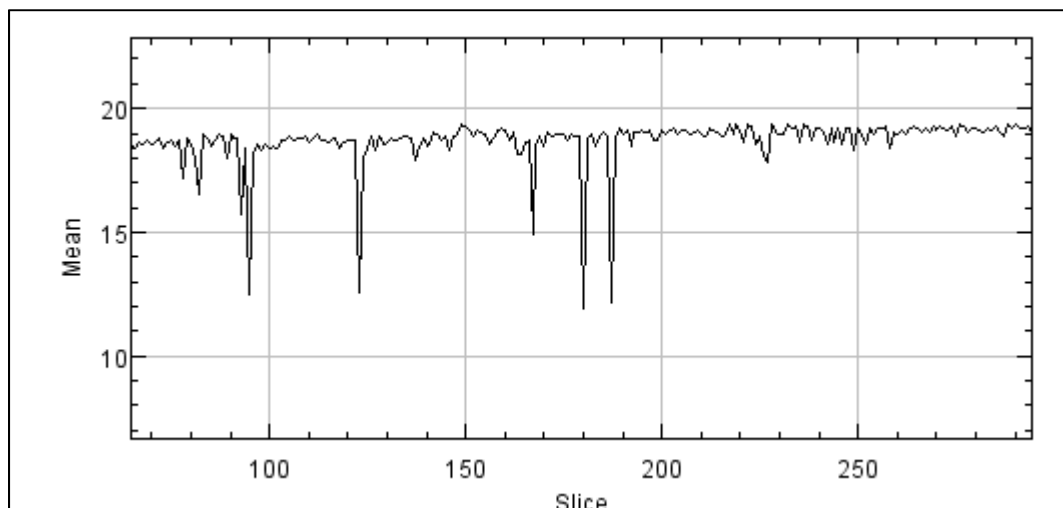


Figure-A IV-1 Graphe profil en z sur une série de photos

Les pics observés correspondent à des images qui vont poser problème à l'analyse. Ce peut être des images où l'on observe un déplacement de la caméra ou alors une image floue. Les déplacements se voient facilement à l'œil lorsque la séquence d'image défile, mais il est plus difficile de voir les images floues. Pour les identifier, l'outil gradient du logiciel Fiji est utilisé.

Deux séries d'images sont alors obtenues, la première avec les images non transformées et la deuxième avec les gradients correspondants.

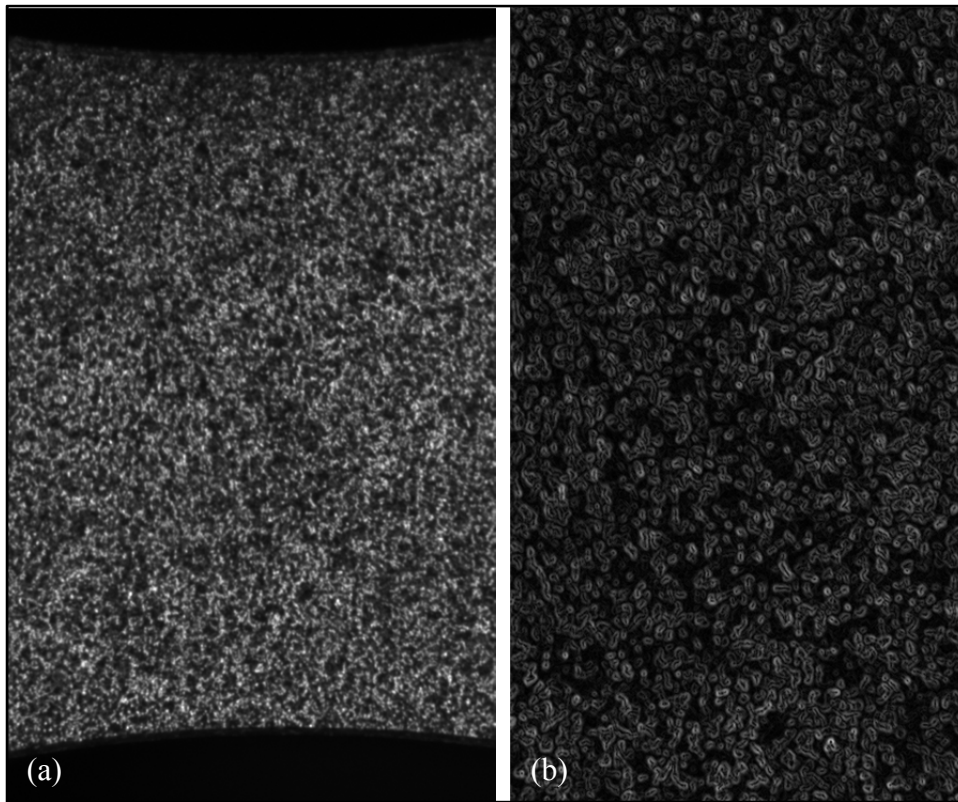


Figure-A IV-2 À gauche (a) : Image floue, à droite (b) : gradient de l'image correspondante

Avec la deuxième série, il est très facile de repérer les images floues : le gradient est foncé et flou également. Il suffit de relever le numéro de l'image gradient et ensuite d'aller vérifier dans les images non modifiées. Les figures A IV-2 et A IV-3 illustrent la différence entre les images floues et nettes.

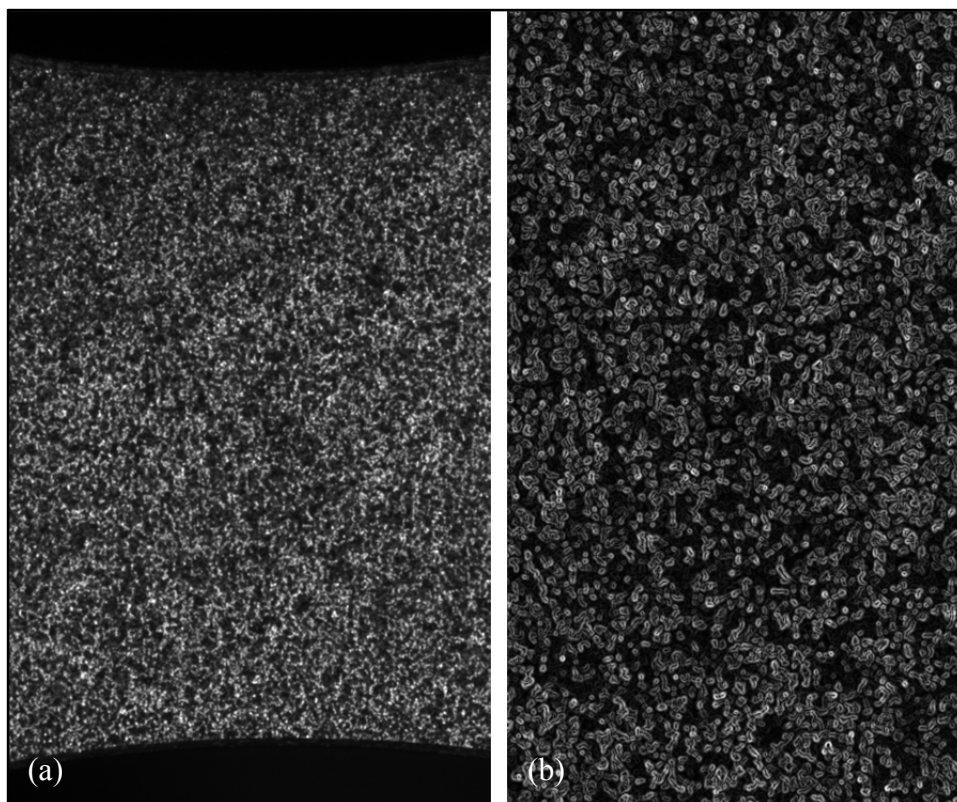


Figure-A IV-3 À gauche (a): photo nette,  
à droite (b) : gradient correspondant



## ANNEXE V

### SIMULATION NUMÉRIQUE AVEC ANSYS WORKBENCH

Avant de réaliser la simulation numérique avec le logiciel de multi physiques COMSOL, une première tentative avait été faite avec le logiciel ANSYS WORKBENCH. Cette tentative n'a pas aboutie car il n'était pas possible de lier une étude de thermique transitoire avec une étude de statique stationnaire. Cependant, les phases de chauffage et refroidissement ont été simulées. Pour passer de 50 °C à 300 °C, il faut 329 secondes alors que pour le refroidissement, il faut compter 750 secondes. Les Figures A V-1 et A V-2 présentent les répartitions de température en fin de chauffage.

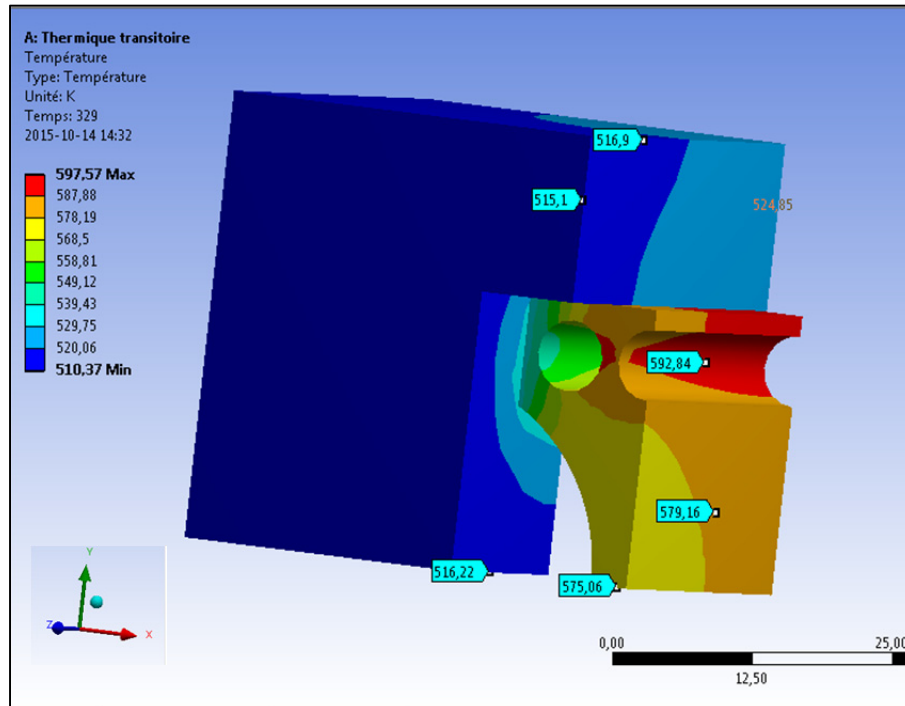


Figure-A V-1 Température en fin de chauffe (329 secondes)

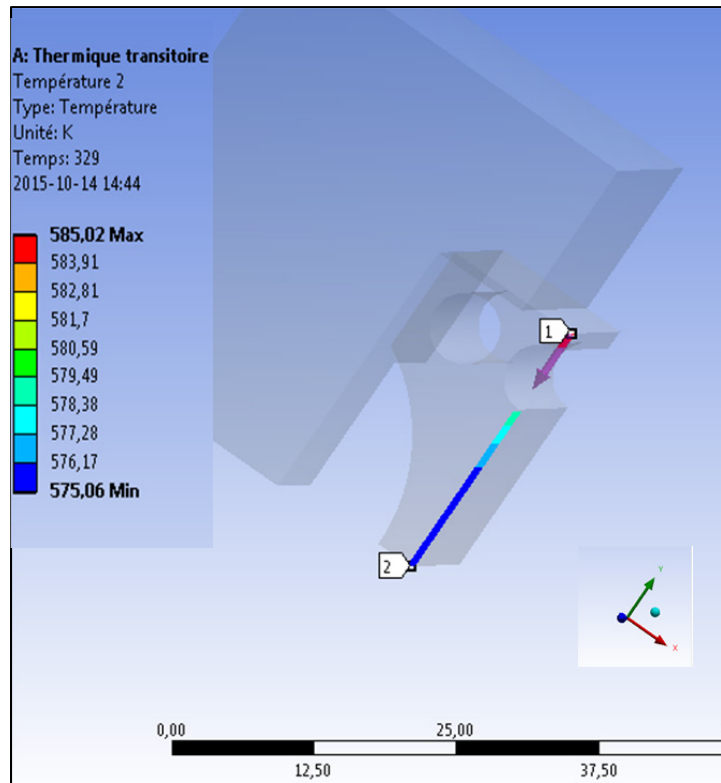


Figure-A V-2 Température sur la hauteur de l'éprouvette en fin de chauffe



## BIBLIOGRAPHIE

- Angeloni, Mauricio. 2011. « Fatigue life evaluation of A356 aluminium alloy used for engine cylinder head ». École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan ; universidade de Sao Paulo.
- ASTM. 2005. *Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing*. E1823.
- Barlas, B., D. Ovono-Ovono, I. Guillot et G. Cailletaud. 2002. « Ageing and fatigue behaviour in cast aluminium alloys ». *Materials Science Forum*, vol. 396-402, p. 1365-70.
- Barlas, Bruno. 2004. « Etude du comportement et de l'endommagement en fatigue d'alliages d'aluminium de fonderie ». Doctorat, Spécialité Sciences et Génie des Matériaux. Paris (France), École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 238 p.
- Barralis, Jean, et Gérard Maeder. 2005. *Métallurgie : élaboration, structures-propriétés, normalisation* (2005), Éd. mise à jour. Coll. « Précis de métallurgie ». Paris: Nathan, vii, 231 p.
- Boyer, Howard E., et Timothy L. Gall. 1991. *Metals handbook* (1991), desk ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1 v. pag. multiple p.
- Caceres, C. H., C. J. Davidson, J. R. Griffiths et Q. G. Wang. 1999. « The effect of Mg on the microstructure and mechanical behavior of Al-Si-Mg casting alloys ». *Metallurgical and Materials Transactions A (Physical Metallurgy and Materials Science)*, vol. 30A, n° 10, p. 2611-18.
- Ezan, Pierre , Saintier, Nicolas. 2014. *Étude de l'interaction fatigue-fluage dans une alliage coulé d'aluminium destiné à une application de moteur Diesel*. Coll. « Rapport de stages », BO-M14003. Bordeaux (France): Arts et Métiers Paritech, 32 p.
- Farkoosh, A. R., X. G. Chen et M. Pegguleryuz. 2013. « The effects of MG, MO and CR on the microstructure and elevated temperature mechanical properties of an AL-SI-CU-MG alloy ». In *Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2013, MS and T 2013, October 27, 2013 - October 31, 2013*. (Montreal, QC, Canada) Vol. 2, p. 1220-1227. Coll. « Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2013, MS and T 2013 »: Association for Iron and Steel Technology, AISTECH.
- Farkoosh, A. R., X. Grant Chen et M. Pegguleryuz. 2014. « Dispersoid strengthening of a high temperature Al-Si-Cu-Mg alloy via Mo addition ». *Materials Science and Engineering A*, vol. 620, p. 181-189.

- Farkoosh, A. R., M. Javidani, M. Hoseini, D. Larouche et M. Pekguleryuz. 2013. « Phase formation in as-solidified and heat-treated Al-Si-Cu-Mg-Ni alloys: Thermodynamic assessment and experimental investigation for alloy design ». *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 551, p. 596-606.
- Farkoosh, A. R., et M. Pekguleryuz. 2013. « The effects of manganese on the T-phase and creep resistance in Al-Si-Cu-Mg-Ni alloys ». *Materials Science and Engineering: A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing)*, vol. 582, p. 248-56.
- Garat, M., Laslaz, G. 2007. « Improved aluminium alloys for common rail diesel cylinder heads ». *American Foundry Society*.
- Ghodrat. 2013. « Thermo--Mechanical Fatigue of Compacted Graphite Iron in Diesel Engine Components ». PhD Thesis. Netherlands, TU Delft, 188 p.
- Gupta, A. K., D. J. Lloyd et S. A. Court. 2001. « Precipitation hardening in Al-Mg-Si alloys with and without excess Si ». *Materials Science & Engineering A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing)*, vol. A316, n° 1-2, p. 11-17.
- Juan, H., Jian-min Zeng et Y. Along. 2007. « Effects of solidification parameters on SDAS of A357 ». In *Engineering Materials III, 16 Nov. 2007*. (Switzerland) Vol. 51, p. 85-91. Coll. « Adv. Mater. Res. (Switzerland) »: Trans Tech Publications Ltd.
- Lados, Diana A., Diran Apelian et J. Keith Donald. 2006. « Fatigue crack growth mechanisms at the microstructure scale in Al-Si-Mg cast alloys: Mechanisms in the near-threshold regime ». *Acta Materialia*, vol. 54, n° 6, p. 1475-1486.
- Lados, Diana A., Diran Apelian et J. Fred Major. 2006. « Fatigue crack growth mechanisms at the microstructure scale in Al-Si-Mg cast alloys: Mechanisms in Regions II and III ». *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, vol. 37, n° 8, p. 2405-2418.
- Liao, Heng-cheng, Yi Ding et Guo-xiong Sun. 2002. « Effect of strontium on crystallization of Mg<sub>2</sub>Si phase in Al-Si-Mg casting alloys ». *Transactions of the Nonferrous Metals Society of China*, vol. 12, n° 3, p. 409-13.
- Moizumi, K., K. Mine, H. Tezuka et T. Sato. 2002. « Influence of precipitate microstructures on thermal fatigue properties of Al-Si-Mg cast alloys ». *Materials Science Forum*, vol. 396-402, p. 1371-6.
- Mondolfo, L.F. 1976. *Aluminium alloys: structure and properties*. London; Toronto : Butterworths, 971 p.

- Nabarro, F. R. N. 2006. « Creep in commercially pure metals ». *Acta Materialia*, vol. 54, n° 2, p. 263-295.
- Nogita, K., et A. K. Dahle. 2003. « Effects of boron on eutectic modification of hypoeutectic Al-Si alloys ». *Scripta Materialia*, vol. 48, n° 3, p. 307-313.
- Saint-Antonin, F. 1999. « Essais de fluage ». *Techniques de l'ingénieur*, vol. m 140.
- Thalmair, Sebastian, Jan Thiele, Andreas Fischersworing-Bunk, Robert Ehart et Melaine Guillou. 2006. « Cylinder heads for high power gasoline engines - Thermomechanical fatigue life prediction ». In *2006 SAE World Congress, April 3, 2006 - April 6, 2006*. (Detroit, MI, United states). Coll. « SAE Technical Papers »: SAE International.
- Wang, Q. G., D. Apelian et D. A. Lados. 2001a. « Fatigue behavior of A356-T6 aluminum cast alloys. Part I. Effect of casting defects ». *Journal of Light Metals*, vol. 1, n° 1, p. 73-84.
- Wang, Q. G., D. Apelian et D. A. Lados. 2001b. « Fatigue behavior of A356/357 aluminum cast alloys. Part II - Effect of microstructural constituents ». *Journal of Light Metals*, vol. 1, n° 1, p. 85-97.
- Zeng, Lei, Junji Sakamoto, Atsushi Fujii et Hiroshi Noguchi. 2014. « Role of eutectic silicon particles in fatigue crack initiation and propagation and fatigue strength characteristics of cast aluminum alloy A356 ». *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 115, p. 1-12.



