



**UNIVERSITAS
INDONESIA**



**Université
de Bretagne-Sud**

STUDI PENUAAN PADA ELECTRODE CUCR1ZR *SPOT WELDING*

TESIS

**AGUS SIFA
1006803890**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM PASCA SARJANA TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2012**



**UNIVERSITAS
INDONESIA**



STUDI PENUAAN PADA ELECTRODE CUCR1ZR *SPOT WELDING*

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik

**AGUS SIFA
1006803890**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
KEKHUSUSAN PERANCANGAN MANUFAKTUR
DAN PENGEMBANGAN PRODUK
DEPOK
JULI 2012**

ii

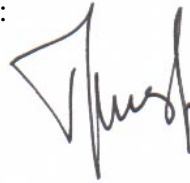
PERNYATAAN ORISINALITAS

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk telah saya nyatakan dengan benar

Nama : AGUS SIFA

NPM : 1006803890

Tanda tangan :



Tanggal : Juli 2012

GAZETTE OF ENDORSEMENT

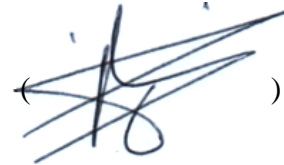
This report of apprentice is submitted by :

Name : Agus Sifa
Student Number : 1006803890
Study Program : Mechanical Engineering
Title : Etude du vieillissement des électrodes en CuCr1Zr de
Soudage Par Point

This report of apprentice has been officially supervised and finally examined by examiners in the Université de Bretagne-Sud on June 28th , 2012.

Board of examiners

Supervisor : Mr. Philippe PILVIN

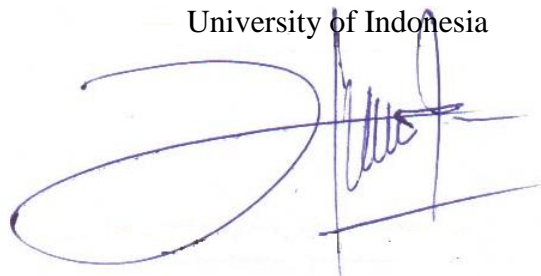


Examiner : Mr. Rodriguez Garcia JAVIER



Legalized by

The Director of Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering,
University of Indonesia



Prof. Dr. Ir. Harinaldi, M. Eng.


KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT karena atas limpahan hidayah-Nya enulisan Tesis dengan judul “**Studi Penuaan pada Electrode CuCr1Zr Spot Welding** dapat diselesaikan dengan baik. Penulisan Tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Departemen Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari semua perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Professeur Philippe PILVIN di Universite de Bretagne Sud sebagai pembimbing dalam penulisan Tesis ini.
2. Seluruh Dosen Master Génie Mécanique et Materiaux di Université de Bretagne Sud yang telah mendidik penulis selama 1 tahun dalam program double degree Indonesia Perancis (DDIP).
3. Dosen Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia yang sudah mendidik penulis.
4. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan dukungan material dan moral; dan
5. Semua pihak yang sudah membantu dengan baik penulisan tesis ini.

Saya menyadari bahwa dalam penulisan tesis ini masih terdapat kesalahan karena keterbatasan pengetahuan penulis. Oleh karena itu dimohon saran untuk perbaikan tesis ini.

Depok, 10 Juli 2011



Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Agus Sifa
NPM : 1006803890
Program Studi : Perancangan Manufaktur dan Pengembangan Produk
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Righth) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Studi Penuaan pada Electrode CuCr1Zr *Spot Welding*

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatakan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagainya pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : Juli 2012

Yang menyatakan,



(Agus Sifa)

ABSTRACT

Name : Agus Sifa
Programe Study : Mechanical Engineering
Title : Study Aging of Electrode CuCr1Zr Spot Welding

This study is to develop the constitutive equations to describe the mechanical deformation of the surfaces active of the electrodes. Most of tests are isotherms to characterize the material behavior at each temperature. Test results will be isothermal is used to identify parameters of the law by using the software SiDoLo and analysis finite element by ABAQUS. The isothermal tests, we can know the value of variable aging all specimens are value between 0-1, then we can say that all specimen were tested that had the aging, modeling is performed to calculate the value of elastic and thermo-elastic, using two software: SYSWELD and ABAQUS, the results of comparison elastic do not have much different and the results of comparison thermo-elastic have different.

Key words: CuCr1Zr, Mechanical behavior, Aging

ABSTRAK

Nama : Agus Sifa

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Studi Penuaan pada Electrode CuCr1Zr *Spot Welding*

Studi ini untuk mengembangkan hukum perilaku mekanik untuk mendefinisikan deformasi pada *face active electrode*. Beberapa pengujian *isothermal* dilakukan untuk mengkarakterisasi perilaku material pada masing-masing temperatur. Hasil pengujian *isothermal* akan digunakan untuk mendefinisikan parameter yang digunakan pada *software* SiDoLo dan perhitungan *finite element* dengan ABAQUS. Hasil pengujian *isothermal*, kami dapat mengetahui nilai dari variable penuaan pada semua sampel memiliki nilai antara 0-1, sehingga dapat kita katakan semua sampel yang telah kita ujikan mengalami penuaan, pemodelan yang dilakukan untuk menghitung nilai *elastic* dan *thermo elastic*, dengan menggunakan dua *software*: SYSWELD dan ABAQUS, hasil perbandingan perhitungan *elastic* tidak memiliki perbedaan yang banyak, dan hasil perbandingan *thermo-elastic* memiliki perbedaan.

Kata kunci : CuCr1Zr, Perilaku mekanik, Penuaan

Daftar Isi

Cover	ii
Pernyataan Orisinalitas	iii
Lembar Pengesahan.....	iv
Kata Pengantar	v
Pernyataan Persetujuan Publikasi	vi
Abstrak.....	vii
Daftar Isi	ix
Daftar Gambar	xi
Daftar Tabel.....	xiii

CHAPITRE I Introduction

Introduction	1
1.1 Description du procédé de soudage.....	2
1.1.1 Principe	2
1.1.2 Paramètres de soudage	3
1.2 Problématique : Usure des Electrode	4
1.2.1 Description du traitement Thermique	6
1.3 CuCr1Zr	7
1.3.1 Généralités	7
1.3.2 Composition	7
1.3.3 Les différentes étapes du traitement de durcissement structural	8
1.3.4 Diagrammes de phases	9
1.3.5 Quelques propriétés physiques	10

CHAPITRE II Essais Matériaux

Introduction	11
2.1 Essais Gleeble	11
2.2 Essais Isothermes	12
2.2.1 Les résultats de Gleeble	12
2.2.2 La contrainte et la déformation	13
2.3 Modèles.....	15
2.3.1 Modèle de Norton	15
2.3.2 La variable de vieillissement.....	16
2.4 Identification du modèle Elasto Visco Plastique avec le logiciel SiDoLo	17
2.4.1 Identification loi de comportement utilise SiDoLo.....	17
2.4.2 Validation loi de comportement utilise ABAQUS (Un élément)	21
2.5 Essais Anisothermes	21
2.6 Modèle Validation Anisothermes ABAQUS.....	24

2.7 Conclusion	27
----------------------	----

CHAPITRE III Modélisation du contact électrode –tôle

Introduction	29
3.1 Modèle Elastique.....	29
3.1.1 Modèle ABAQUS	29
3.1.1.1 Le contact avec frottement	30
3.1.1.2 Le contact sans frottement.....	32
3.1.1.3 Comparaison calculs ABAQUS avec et sans frottement	34
3.1.2 Modèle SYSWELD	34
3.1.2.1 Le contact sans frottement	35
3.1.3 Comparaison les résultats élastiaue des ABAQUS et SYSWELD	36
3.2 Modèle Thermos-Elastique	37
3.2.1 Modèle ABAQUS	37
3.2.1.1 Le contact avec le frottement	40
3.2.1.2 Le contact sans le frottement	42
3.2.2 Modèle SYSWELD	45
3.2.2.1 Le contact sans frottement	46
3.2.3 Comparaison les résultats ABAQUS et SYSWELD	47
3.3 Conclusion	49
CHAPITRE IV Conclusion	50
BIBLIOGRAPIE	51
ANNEXES.....	52

Daftar Gambar

Figure 1. Etapes du procédé lors du soudage par point.....	3
Figure 2. Implantation du thermocouple	4
Figure 3. Mesure de la température d'une électrode au cours du soudage	4
Figure 4. Evolution de la dureté avant et après soudages	5
Figure 5. Courbe d'incrémentation du courant I.....	6
Figure 6. Macrographie de la face active après soudage	7
Figure 7. Micrographie de l'alliage CuCr1Zr les précipités grossier de chrome apparaissent en bleu.....	8
Figure 8. Diagramme d'équilibre de l'alliage Cu-Cr [5]	9
Figure 9. Diagramme d'équilibre de l'alliage Cu-Zr [5].....	10
Figure 10. Schéma du dispositif essai Gleeble sur du CuCr1Zr	11
Figure 11. Préparation d'éprouvette sur de CuCr1Zr	12
Figure 12. La courbe de température et force d'éprouvette lbitm-01a	14
Figure 13. La courbe de contrainte et déformation d'éprouvette lbitm-01a	15
Figure 14. Comparaison les courbes de contrainte en fonction de déformation des résultats SiDoLo et expérience.....	19
Figure 15. La courbe de Ka en fonction de a d'éprouvette lbitm-01a	19
Figure 16. Les courbes de la valeur de température et la valeur force	22
Figure 17. Les courbes de la valeur de stroke et la valeur force.....	22
Figure 18. Les courbes de la valeur de température en fonction du temps.....	23
Figure 19. Les courbes de la valeur de déformation en fonction du temps	23
Figure 20. Les courbes de la valeur contrainte et déformation de l'éprouvette validation	24
Figure 21. Vue 2D initial condition la modèle validation un élément.....	25
Figure 22. Vue 2D l'isovaleur de déplacement 22.....	25
Figure 23. La courbe de température en fonction du temps.....	25
Figure 24. La courbe de la valeur de contrainte 22 en fonction du temps	26
Figure 25. La courbe de la valeur de déformation 22 en fonction du temps	26
Figure 26. Les courbes de comparaison de la valeur de deformation et contrainte en fonction du temps.....	27
Figure 27. Vue 2D modélisation contact électrode et tôle ABAQUS.....	29
Figure 28. Vue 2D les Maillages ABAQUS	30
Figure 29. Vue 2D du maillage déformé.....	30
Figure 30. Vue 2D les contraintes von mises et les contraintes 22	31
Figure 31. Vue 2D du maillage déformé sans le frottement	32
Figure 32. Vue 2D les contraintes von mises et contraintes 22 sans le frottement.....	33
Figure 33. Vue 2D les maillages élastique SYSWELD.....	35
Figure 34. Vue 2D déformation élastique SYSWELD	35
Figure 35. Vue 2D la condition initial de la modèle thermo – élastique dans ABAQUS.....	38
Figure 36. Vue 2D les maillages du modèle ABAQUS.....	38
Figure 37. La courbe d'illustration de changement de température sur la modèle thermo-élastique	39
Figure 38. La courbe d'illustration de changement de force sur la modèle	

Thermo-élastique	39
Figure 39. La courbe de température et réaction de force dans ABAQUS.....	40
Figure 40. Vue 2D du maillage déformé de modèle ABAQUS avec frottement.....	41
Figure 41. Vue 2D les contraintes von mises et les contraintes de l'orientation 22 dans ABAQUS.	41
Figure 42. Vue 2D du MAILLAGE déformé sans le frottement dans ABAQUS	42
Figure 43. Vue 2D les contraintes von mises et les contraintes 22 sans le frottement dans ABAQUS.....	43
Figure 44. Vue 2D les contraintes 22 sans le frottement de modèle ABAQUS au temps 0,31s et 3,1s.....	44
Figure 45. Vue 2D modélisation contact électrode et tôle thermos-élastique SYSWELD	45
Figure 46. Vue 2D les maillages thermo-élastique SYSWELD	46
Figure 47. Vue 2D les maillages déformé la modèle thermo-élastique SYSWELD	46
Figure 48. Vue 2D les isovaleurs des contrainte 22 et deformation22 de thermo- élastique SYSWELD sans frottement.....	47
Figure 49. Comparaison les courbes de température dans ABAQUS et SYSWELD	48

Daftar Tabel

Tableau 1. Composition du CuCrZr [3].	7
Tableau 2. Propriétés physiques de l'alliage CuCr1Zr	10
Tableau 3. Diamètre des éprouvettes	13
Tableau 4. Les résultats de SiDoLo les paramètres sans variable de vieillissement.	20
Tableau 5. Les résultats de SiDoLo les paramètres avec variable de vieillissement.	20
Tableau 6. Etat de vieillissement	21
Tableau 7. L'éprouvette lbitm-08	21
Tableau 8. Les propriétés du matériau	29
Tableau 9. Les résultats de calcul élastique avec frottement dans ABAQUS	32
Tableau 10. Le résultat de calcul sans frottement ABAQUS.	33
Tableau 11. Les propriétés du matériau	34
Tableau 12. Le résultat de calcul sans frottement SYSWELD	35
Tableau 13. Comparaison des résultats élastique électrode des ABAQUS et SYSWELD	35
Tableau 14. Les propriétés du matériau	37
Tableau 15. Les résultats de calcul thermo-élastique ABAQUS avec frottement.	42
Tableau 16. Les résultats de calcul thermo-élastique ABAQUS sans frottement au temps 0, 31s	43
Tableau 17. Les résultats de calcul thermo-élastique sans frottement ABAQUS au temps 3,1s	44
Tableau 18. Les propriétés du matériau dans SYSWELD	45
Tableau 19. Les résultats de calcul sans frottement SYSWELD	47
Tableau 20. Comparaison les résultats de calcul sans frottement dans SYSWELD et ABAQUS	48

CHAPITRE I

Introduction

Ce stage s'inscrit dans le cadre de la thèse de la doctorante Elise Gauthier qui travaille, au laboratoire de recherche LIMATB de l'Université De Bretagne-Sud, sur la modélisation et la simulation numérique de la dégradation des électrodes de soudage par résistance par points. Ce projet, réalisé en collaboration avec l'industriel PSA Peugeot-Citroën, est financé par la région Bretagne (bourse de thèse de doctorat ARED « ELECSOUD »). Il bénéficie aussi de l'appui technique de la société Le Bronze Industriel (LBI) qui est un des principaux fournisseurs français d'électrodes. Plusieurs études sur la problématique des formations de points soudés, en particulier dans le cas du soudage de tôles à haute limite élastique, ont déjà été réalisées au Laboratoire en partenariat avec l'industriel PSA Peugeot-Citroën. Ces tôles, soudées par résistance par point avec des électrodes en alliages de cuivre, sont le plus souvent galvanisées pour lutter contre la corrosion. L'alliage CuCr1Zr (Cuivre-Chrome-Zirconium) utilisé pour la fabrication des électrodes, subit des traitements thermiques durcissant lui permettant d'avoir des propriétés mécaniques et électriques initiales optimales. Or l'accumulation de points soudés peut entraîner la déformation et l'érosion des électrodes ce qui conduit à un vieillissement rapide et donc un remplacement prématuré de ces électrodes.

Les mécanismes de dégradation font intervenir de nombreux phénomènes couplés tels que l'adoucissement de l'alliage (dissolution/coalescence des précipités durcissant), la fatigue thermomécanique (consécutive à l'accumulation des cycles de soudage) ainsi que l'attaque chimique par le zinc liquide. Ce dernier phénomène, spécifique aux tôles galvanisées ou électro-zinguées, se traduit concrètement par une usure rapide de l'électrode comparativement au cas des tôles non revêtues. Le but de la thèse d'Elise Gauthier est donc de comprendre et modéliser les mécanismes de dégradation des embouts de soudage. En premier lieu l'étude s'est attachée à la modélisation des phénomènes d'adoucissement des électrodes à l'aide du logiciel aux éléments finis SYSWELD®. Pour ce faire deux

modèles métallurgiques sont utilisés pour simuler les évolutions microstructurales dans l'électrode. Pour déterminer les valeurs des paramètres de ces modèles, des essais de vieillissement isothermes sont effectués et l'évolution microstructurale dans les éprouvettes est caractérisée via des mesures de dureté.

L'objectif de ce stage est de développer la loi de comportement mécanique pour décrire la déformation des faces actives des électrodes. Ainsi, nous devons réaliser des essais Gleeble pour caler cette loi de comportement du matériau CuCr1Zr. Et en suite, des essais avec une électrode en contact avec une pastille en molybdène, nous permettra de valider la loi de comportement.

1.1 Description du procédé de soudage

Le soudage par résistance est un procédé simple et rapide, qui produit de la chaleur grâce aux résistances électriques aux interfaces en appliquant un effort de serrage, et une forte intensité électrique.

C'est un procédé de soudage sans atmosphère protectrice. Le soudage par point (RSW) ne nécessite pas de métal d'apport. L'effet Joule sert de source de chaleur. En général, ce type de soudage est utilisé pour des tôles d'acier galvanisées ou non et d'épaisseur comprises entre 0,5 et 3 mm.

1.1.1 Principe

Un cycle de soudage se décompose en trois phases (Cf : Figure 1):

- **l'accostage** : les électrodes viennent comprimer les tôles à souder. Lorsque que la valeur d'effort nominale est atteinte, la phase suivante commence.
- **le soudage** : un courant alternatif de forte intensité passe à travers l'assemblage et fait fondre localement les métaux à assembler.
- **le forgeage** : le courant est stoppé et l'effort maintenu. La zone fondue se refroidit et forme une liaison entre les tôles.

A la fin du forgeage les électrodes se séparent. Le noyau continue de se refroidir. Les électrodes sont opérationnelles pour réaliser le point suivant. Au cours du soudage les électrodes se déforment.

Ainsi tous les 420 points soudés, la face active des embouts est usinée (rodage).

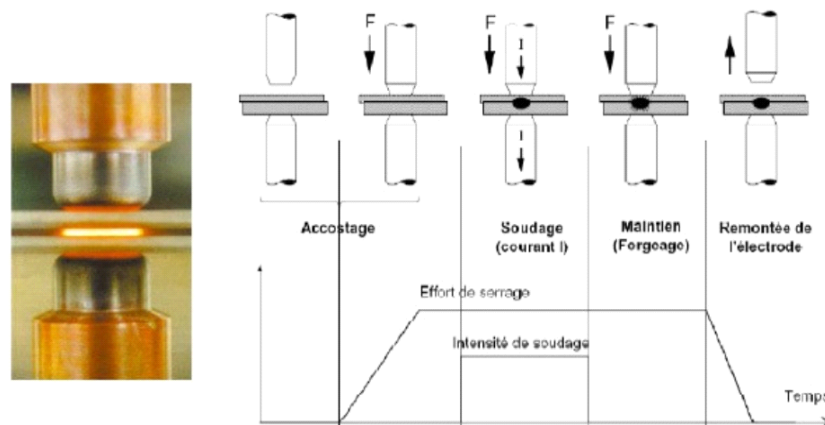


Figure 1. Etapes du procédé lors du soudage par point.

1.1.2 Paramètres de soudage

Au cours du cycle du soudage, quatre principaux paramètres interviennent

:

- l'effort de serrage F** : il est appliqué avant, pendant et après le passage du courant. La valeur de l'effort dépend essentiellement des caractéristiques mécaniques et de l'épaisseur des tôles.
- le courant de soudage I** : il dépend de la nature et de l'épaisseur des tôles à assembler. Typiquement, le courant est alternatif (généralement de fréquence 50Hz) dont l'intensité efficace varie de 5000 à 20000 A.
- la durée de la phase de soudage** : ce paramètre est aussi lié aux propriétés des tôles. Cette durée se compte en périodes (0,02s dans le cas du 50Hz). Le temps de soudage est habituellement compris entre 10 et 13 périodes.
- la durée de la phase de forgeage** : cette durée est aussi comptée en période. Elle est du même ordre de grandeur que le temps de soudage (10 à 12 périodes).

1.2 Problématique : usure des électrodes

Le procédé de soudage par point est étudié au laboratoire depuis plusieurs années. Les travaux de thèse de G. Sibilia [1] et R. Raelison [2] étaient dédiés à la caractérisation et la modélisation de la formation des points soudés (PtSE). De plus, PSA a identifié de nombreux problèmes liés à la dégradation prématurée des embouts de soudage dans ses usines. L'usure des électrodes est devenue un des points pénalisant pour améliorer la productivité de ce procédé.

Au cours du soudage, les électrodes subissent un échauffement cyclique (Cf : Figure 2 et Figure 3) qui provoque un adoucissement. Cet adoucissement situé en proximité de l'interface électrode/tôle entraîne une diminution des propriétés mécaniques du matériau (Cf : Figure 1). Les électrodes étant moins dures, leur face active se déforme lors des phases de soudage et forgeage où elles sont soumises à un effort de serrage.

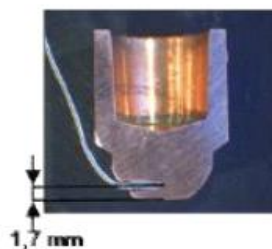


Figure 2. Implantation du thermocouple.

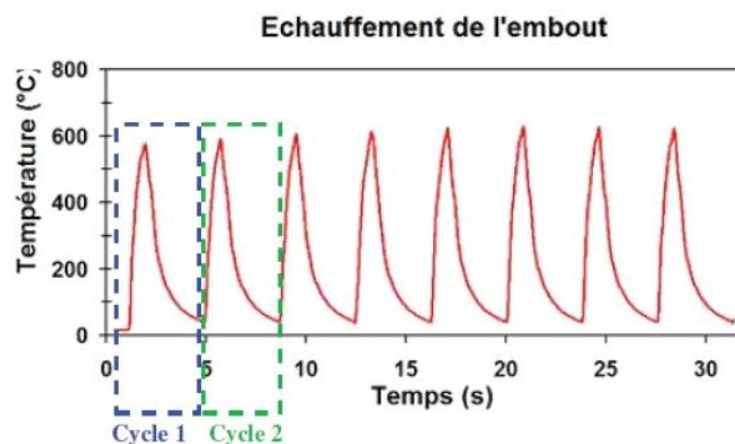


Figure 3. Mesure de la température d'une électrode au cours du soudage.

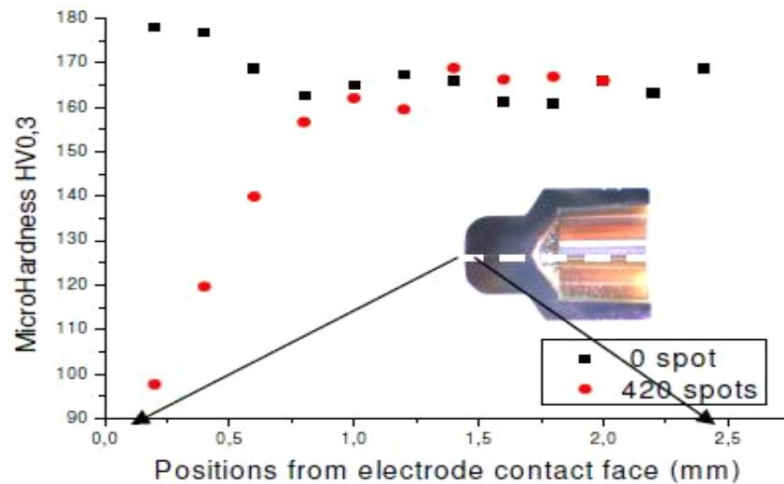


Figure 4. Evolution de la dureté avant et après soudage.

Pendant la phase de soudage, la valeur du courant I pour un assemblage donné est directement liée au profil de la face active des électrodes. Avec des jeux d'électrodes neuves à face active convexe le courant est minimal. Au fur et à mesure des points, les électrodes s'usent et s'aplatissent, la valeur du courant est alors augmentée pour conserver l'énergie injectée dans l'assemblage. La courbe d'incrémentation du courant qui est programmée sur les machines de soudage permet de compenser l'usure des faces actives des électrodes jusqu'à l'étape de rodage (Cf : Figure 5).

Pour éviter les problèmes de corrosion, les tôles utilisées dans l'industrie automobile sont galvanisées. Lors du soudage, la température de fusion du revêtement de zinc est dépassée. Au niveau des interfaces électrode/tôle, le zinc sous forme liquide peut donc diffuser dans les électrodes et former une couche de laiton. A chaque fois que les électrodes s'écartent des tôles, une partie de cette couche est arrachée et reste sur les tôles. Les phénomènes d'adoucissement et de laitonnage sont couplés et provoquent la dégradation rapide des embouts et leurs usures.

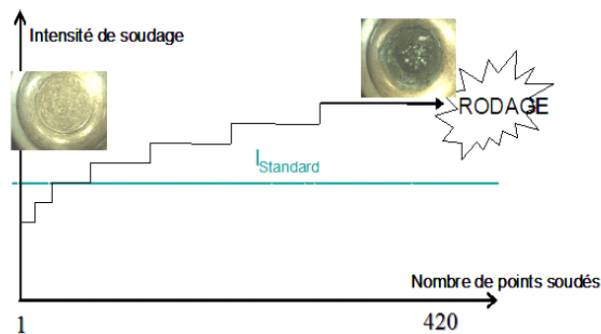


Figure 5. Courbe d'incrémentation du courant I.

1.2.1 Description du traitement thermique

Après un certain nombre de points soudés, la face de l'électrode est détériorée et agrandie (Cf : Figure 6). Cet agrandissement de la face active réduit notamment le diamètre du noyau souhaité. En premier lieu, le recalage de l'intensité s'effectue en augmentant sa magnitude pour maintenir la taille de diamètre du noyau défini. Avec un certain nombre de points soudés après recalage, il est inévitable de remplacer les électrodes à cause du mauvais état de la face active.

Le nombre maximum des points soudés avant le remplacement définit la durée de vie des électrodes. Elle dépend principalement du type de revêtement. Elle peut être de plusieurs dizaines de milliers de points pour l'assemblage de tôles nues et de quelques centaines de points pour l'assemblage de tôles à revêtement organique ou zinguées. Dans le cas des tôles revêtues zinguées, l'usure des électrodes est particulièrement rapide (avec - par ordre de vitesse de dégradation - les revêtements galvanisé-allié, électro-zingué et galvanisé). Pour ces tôles, on assiste à la création d'un alliage entre le cuivre des électrodes et le zinc du revêtement (formation de laiton) et le nombre de points soudés avant remplacement de l'électrode n'est que de quelques centaines [3].

Pour expliquer ce phénomène une hypothèse est qu'en soudage par résistance par point, et contrairement aux cas du soudage à l'arc et du soudage laser, le zinc ne se vaporise pas sous l'effet de la chaleur, car la zone de soudure est sous pression de l'effort de soudage appliqué par les électrodes. En conséquence les composés du revêtement à l'état liquide, et notamment le zinc,

génèrent une attaque chimique de l'alliage de cuivre qui se traduit par une usure rapide de l'électrode comparativement au cas des tôles non revêtues.

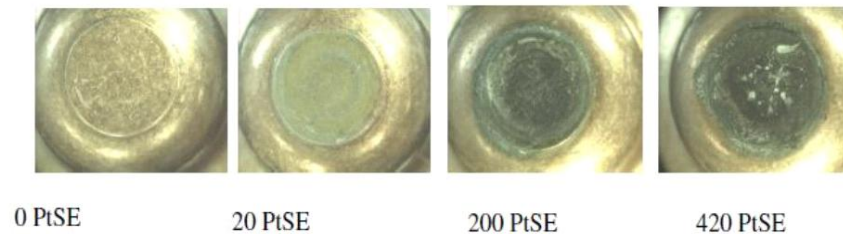


Figure 6. Macrographie de la face active après soudage.

1.3 CuCr1Zr

1.3.1 Généralités

Le cuivre possède une conductivité thermique élevée, ce qui le rend particulièrement intéressant pour le soudage par point. Cependant, ses propriétés mécaniques se dégradent rapidement lors de sollicitations en température. Afin de les améliorer, il est nécessaire d'ajouter des éléments d'alliage.

L'alliage Cu-Cr-Zr est très utilisé dans le domaine du soudage mais aussi dans l'industrie du nucléaire pour ses bonnes propriétés physique. Cet alliage fait partie des alliages à durcissement structural par précipitation.

1.3.2 Composition

Les caractéristiques mécaniques des alliages cuivreux faiblement alliés peuvent s'améliorer par durcissement structural grâce à un traitement thermique qui se déroule en trois.

La composition de l'alliage utilisé pour le soudage par point, est définit selon la norme [3] qui précise les intervalles de composition suivant (Cf : Tableau 1) :

Tableau 1. Composition du CuCrZr [3].

Eléments	Cu (pd%)	Cr (pd%)	Zr (pd%)
Composition	Reste	0,5 – 1,2	0,03 – 0,3

1.3.3 Les différentes étapes du traitement de durcissement structural

Le traitement de durcissement structural comprend la succession des étapes suivantes :

- Un traitement thermique à haute température (généralement de 750 à 1000°C selon les alliages) pour mettre les éléments d'addition en solution afin d'obtenir une solution solide homogène en composition chimique. Après ce traitement, et vu la faible solubilité du chrome dans le cuivre, il reste toujours des précipités du chrome qui sont visibles au microscope optique, ces précipités sont représentés dans la Figure 7 [4].

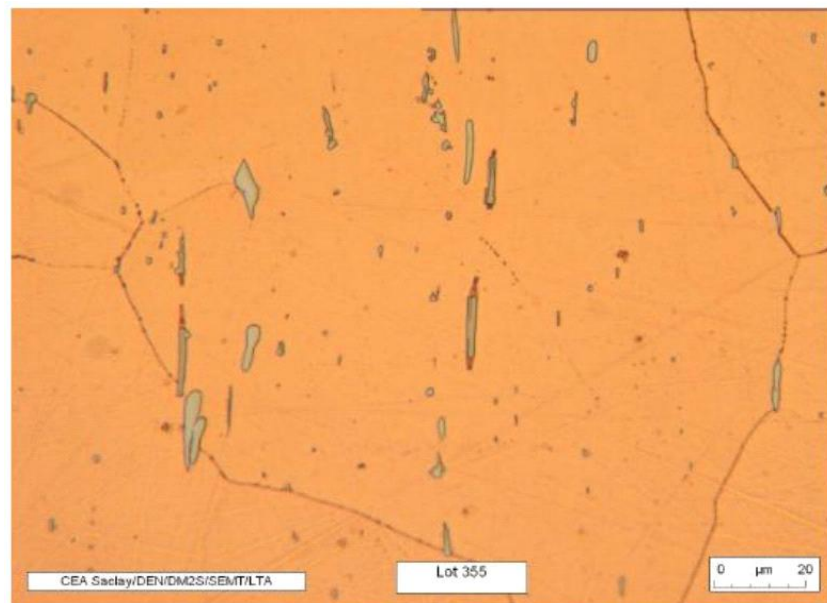


Figure 7. Micrographie de l'alliage CuCr1Zr [4] Les précipités grossiers de chrome apparaissent en bleu.

- Une trempe (T) à l'eau pour maintenir l'élément d'addition en solution solide sursaturée à la température ambiante. Dans cet état T l'alliage est ductile et ses conductivités thermiques et électriques sont abaissées, comme pour toute solution solide.

- Un revenu (R) aux températures moyennes (généralement 300 à 500 °C sur une durée de 4 à 5h selon les nuances). A ce stade la solution solide s'appauvrit en élément d'addition et des nano précipités de chrome se forment.

L'alliage durcit et les conductivités thermique et électrique s'améliorent rapidement.

1.3.4 Diagrammes de phases

a. Système Cu-Cr

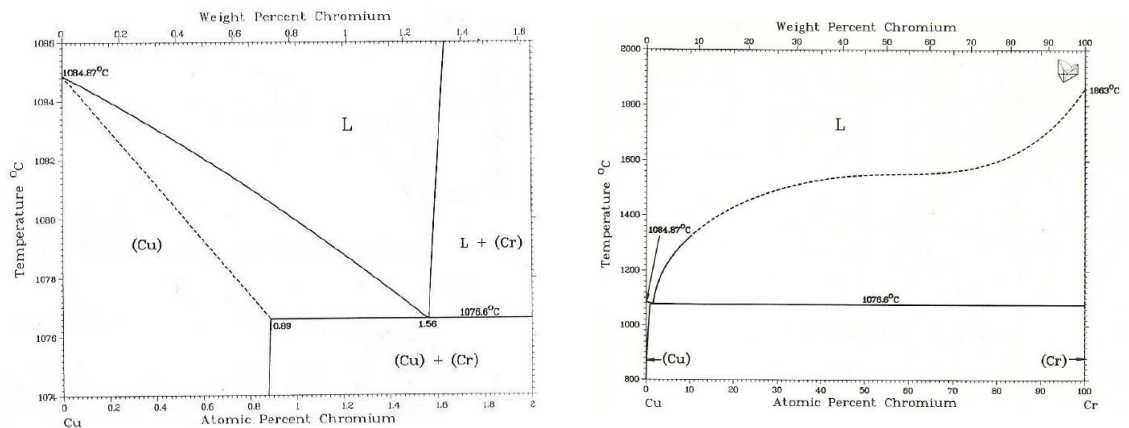


Figure 8. Diagramme d'équilibre de l'alliage Cu-Cr [5].

La figure 8 présente le diagramme d'équilibre du système cuivre chrome. Il existe un eutectique à 1077°C pour une composition de 1.25 pds% de chrome. Le cuivre ne présente pas de forme allotropique.

b. Système Cu-Zr

Le diagramme d'équilibre du système Cu-Zr est représenté sur la figure 9. Ce diagramme présente cinq eutectiques (10 pds%, 966°C), (47 pds%, 886°C), (53 pds%, 891°C), (62 pds%, 929°C), (78.5 pds%, 886°C). Six composés définis existent (β , γ , δ , ρ , ζ , η). Le zirconium présente deux phases allotropiques α Zr et β Zr. Le cuivre admet très peu de zirconium en solution solide.

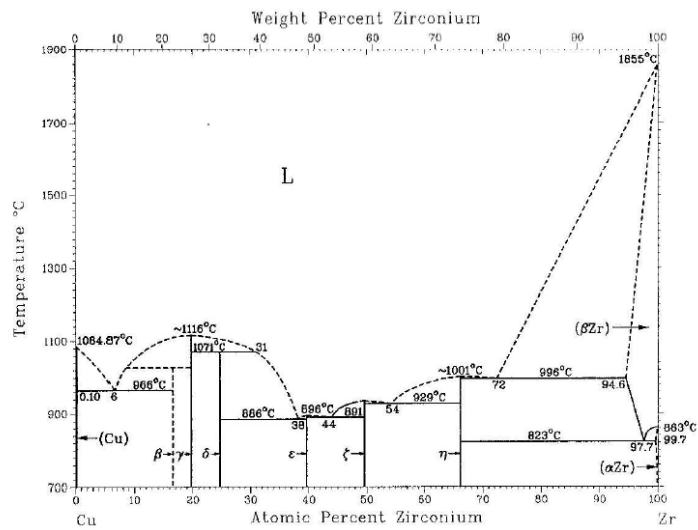


Figure 9. Diagramme d'équilibre de l'alliage Cu-Zr [5].

1.3.5 Quelques propriétés physiques

Le tableau 2 résume les principales propriétés physiques d l'alliage CuCr1Zr [6].

Tableau 2. Propriétés physiques de l'alliage CuCr1Zr.

Propriétés physiques	CuCr1Zr
Température du liquidus (°C)	1080
Température du solidus (°C)	1070
Intervalle de solidification (°C)	10
Masse volumique à 20°C (kg/dm ³)	8.9
Coefficient de dilatation linéaire (10 ⁻⁶ /°C)	18
Capacité thermique massique à 20°C (J/(kg.K))	377
Conductivité thermique à 20°C (W/(m.K))	322
Conductivité électrique à 20°C (% IACS)	80
Résistivité électrique à 20°C (10 ⁻⁸ Ω.m)	2.1

CHAPITRE II

Essais Matériaux

Introduction

Cette section est une première étape pour comprendre le comportement de CuCr1Zr. La plupart des essais réalisés sont isothermes pour caractériser le comportement du matériau pour chaque température. Les résultats des tests isothermes seront utilisés pour identifier les paramètres de la loi en utilisant le logiciel SiDoLo et le calcul aux éléments finis ABAQUS. Un seul essai anisotherme est réalisé pour valider le modèle.

2.1 Essais Gleeble

La machine Gleeble permet de piloter la charge et le déplacement sur des éprouvettes instrumentées chauffées par effet Joule et soumises à des variations rapides de température. La Gleeble est un simulateur thermomécanique qui permet d'appliquer des sollicitations mécaniques (traction, compression) à des éprouvettes dont la température est contrôlée.

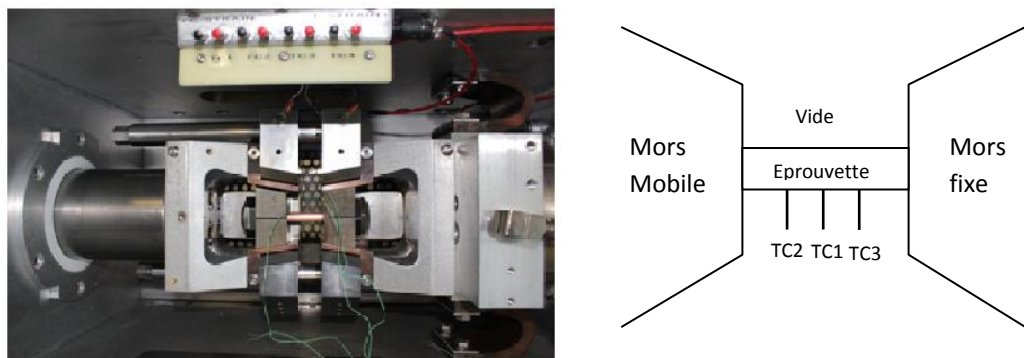
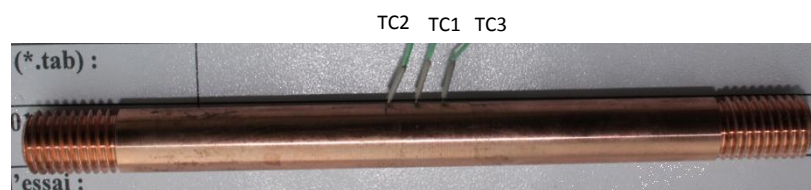


Figure 10. Schéma du dispositif essai Gleeble sur du CuCr1Zr.



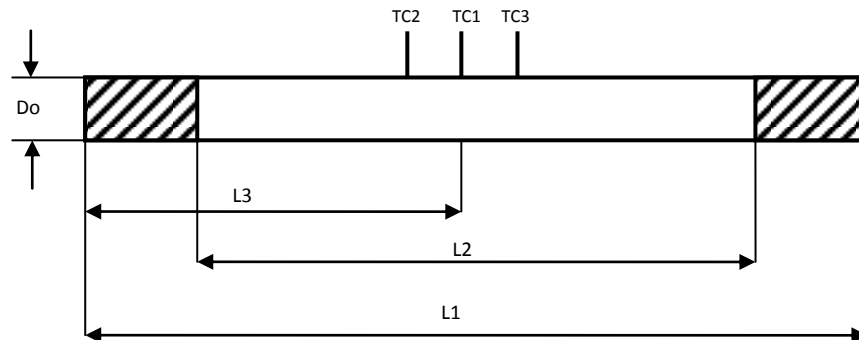


Figure 11. Préparation d'éprouvette sur du CuCr1Zr.

- (Lo) = Longueur Eprouvette (mm)
- (L3) = Distance non filète (mm)
- (L2) = Longueur non Filète (mm)
- (Do) = Diameter initial (mm)
- TC1 = Thermocouple 1
- TC2 = Thermocouple 2
- TC3 = Thermocouple 3

2.2 Essais Isothermes

2.2.1 Les Résultats de Gleeble

Nous avons réalisé plusieurs essais à différentes températures, Les traitements isothermes imposés à nos éprouvettes sont regroupés dans le tableau 2 (Cf : Tableau 3). Nous avons tout d'abord installé l'éprouvette dans le mors de la machine Gleeble. Dans un premier temps, nous avons chauffé l'éprouvette à température souhaitée. Vous pouvez observer les courbes de pilotages de nos essais. Les valeurs du diamètre mesurées avant de débiter les essais se trouvent dans le tableau ci-dessous:

Tableau 3. Diamètre des éprouvettes

Eprouvette	Diamètre D0 (mm)	Temps de maintien avant essais (s)	Température Essais (°C)
Lbitm-01a	9,95	600	750
Lbitm-02a	9,97	60	650
Lbitm-02b	9,97	25	650
Lbitm-03a	9,98	60	600
Lbitm-03b	9,98	30	750
Lbitm-05a	9,99	60	500
Lbitm-05b	9,99	1	800
Lbitm-06a	10,03	15	700
Lbitm-06b	10,03	900	700
Lbitm-07a	10,11	30	700
Lbitm-07b	10,11	1	775

2.2.2 La contrainte et la déformation

L'essai thermo-mécanique détermine l'aptitude d'un matériau à se déformer, soumis à un effort variable. Ce type d'essai est nécessaire pour observer le comportement du matériau dans des conditions réelles d'utilisation.

L'essai thermo-mécanique consiste à appliquer sur une éprouvette du matériau d'étude un effort F et à mesurer les déformations via un dilatomètre, ou inversement d'imposer des déformations dilatomètre à mesurer l'effort F. Dilatomètre et F sont des grandeurs physiques liées à la structure ici à l'éprouvette. Afin de les interpréter et ainsi de caractériser le matériau, on introduit des variables relatives au matériau : la contrainte σ et la déformation ε [7].

- La contrainte σ de cauchy associée a la force F est définie par ;

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad \text{eq.(1)}$$

Avec S la section de l'éprouvette. Cette grandeur σ est à distinguer de la contrainte conventionnelle.

- La déformation ε , dans l'hypothèse des petites déformations, est égale au cumul des déformations élémentaires $\delta\varepsilon = \delta D/D$, dans notre cas, on utilise ;

$$\varepsilon_{zz} = \int_{D_0}^D \frac{l}{l_0} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad \text{eq.(2)}$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \int_{D_0}^D \frac{dD}{D} = \ln\left(\frac{D}{D_0}\right) \quad \text{eq.(3)}$$

1.) l'éprouvette lbitm-01a

a. Les Chargements

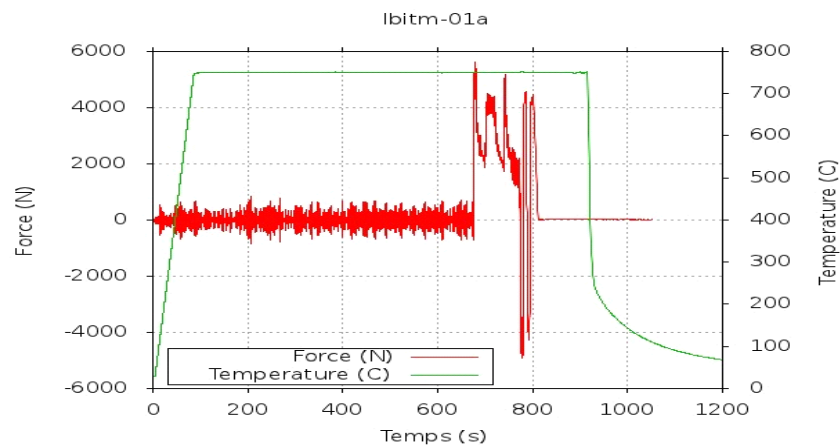


Figure 12. La courbe de température et force d'éprouvette lbitm-01a.

L'éprouvette est chauffée à 750 °C pendant 600 s avant de réaliser l'essai mécanique. Une succession de trois traction-relaxation est réalisée à trois vitesses de déformation différentes pour limiter le nombre d'essais. Ensuite on réalise des cycles de traction/compression pour obtenir des informations sur l'écrouissage du matériau.

b. Calcul de résultat Gleeble l'éprouvette lbitm-01a

Après dépouillement, on obtient la courbe de contrainte en fonction de déformation. La valeur du diamètre initial à 750 °C est $D_1 = 10,566$ mm. Nous l'avons observé grâce au dilatomètre qui mesure l'évolution du diamètre.

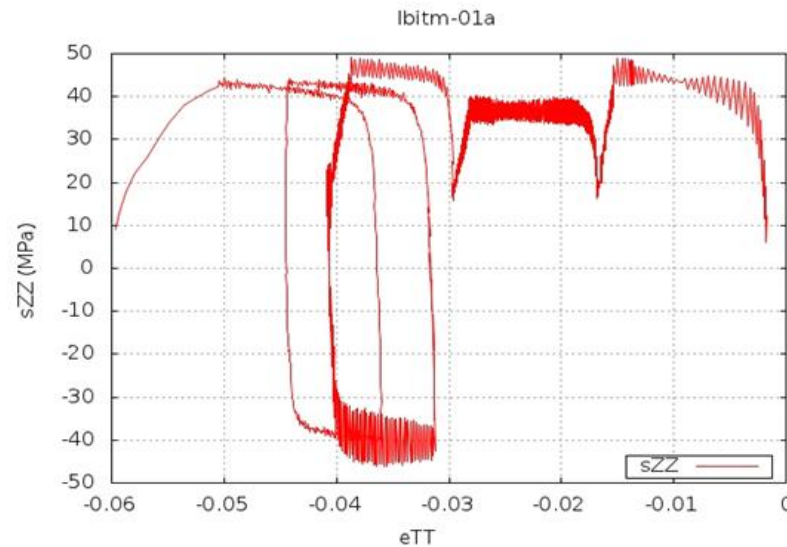


Figure 13. La courbe de contrainte et déformation d'éprouvette lbitm-01a.

D'après la figure ci-dessus, on en déduit que ce matériau à un comportement visqueux et qu'il y a peu d'écrouissage.

Pour les éprouvettes lbitm-02a, lbitm-02b, lbitm-03a, lbitm-05a, lbitm-05b, lbitm-06a, lbitm-06b, lbitm-07a, lbitm-07b, vous pouvez vous référer à l'annexe pour obtenir les courbes de résultat.

2.3 Modèles

2.3.1 Modèle de Norton

On appelle classiquement modèles à écrouissage additif ceux qui jouent sur les variables de type plasticité et modèles à écrouissage multiplicatif ceux qui jouent sur la contrainte visqueuse. Une approche où les deux mécanismes sont présents est bien entendu également envisageable. Par ailleurs, contrairement au cas de la plasticité, on peut ici considérer un modèle dans lequel le domaine d'élasticité se réduit à l'origine ($\sigma = 0$), et qui ne possède pas d'écrouissage [5]. Ainsi le modèle le plus courant est le modèle de Norton (avec deux paramètres matériau K et n) :

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \left(\frac{|\sigma| - \sigma_y}{K} \right)^n \text{signe}(\sigma) \quad \text{eq.(4)}$$

On obtient les paramètres n , K et σ_y en procédant par approximations successive pour le choix de la limite d'élasticité σ_y . La limite d'élasticité σ_y a toujours une valeur très faible, largement inférieure à la limite d'élasticité apparente de l'essai d'écroutissage, ceci dû à deux raisons ; la grande non linéarité du phénomène de viscoplasticité et la possibilité d'écoulement viscoplastiques pour des contraintes très faibles [8].

2.3.2 La variable de vieillissement

Le modèle avec vieillissement consiste à introduire une variable de vieillissement a [9] dont la équation s'exprime par (modèle de Le blond-Devaux);

$$\frac{da}{dt} = \left[\frac{a_\infty(T) - a}{\tau(T)} \right] \quad \text{eq.(5)}$$

$a_\infty(T)$ = % de phase adoucit maximal

$\tau(T)$ = Temps de retard de la transformation

Cette variable illustre l'impact de l'évolution de l'état de précipitation sur le comportement mécanique du matériau. Elle varie entre deux valeurs extrêmes qui correspondent à ;

- $a = 0$; le matériau n'a pas subi de vieillissement (durcissement maximal, état initial)
- $a = 1$; le matériau a complètement vieilli (adoucissement maximal)

Aux hautes températures, a atteindra toujours la valeur 1 pourvu que l'on attende suffisamment long temps. Par contre ce ne sera pas le cas aux températures intermédiaires.

On appelle alors a_∞ la valeur asymptotique du vieillissement. Elle varie entre 0 et 1, et vaut 0 à froid et 1 à la température correspondant à un vieillissement maximal. τ est un paramètre dépendant de la température assimilable à un temps d'incubation pour l'adoucissement (temps de retard à la transformation).

Les mesures expérimentales indiquent bien que le vieillissement affecte directement la limite d'élasticité du matériau.

D'où l'idée de décomposer cette dernière en deux parties ;

$$K(a) = K_v + (K_0 - K_v)(1 - a) \quad \text{eq.(6)}$$

2.4 Identification du modelé élasto-visco plastique avec le logiciel SiDoLo

2.4.1 Identification loi de comportement utilisé SiDoLo

Pour réaliser l'identification des paramètres inconnus de la loi de comportement, le logiciel SiDoLo est utilisé. Ce logiciel permet, lorsque l'on souhaite confronter un modèle à des résultats expérimentaux, une estimation de tous les paramètres du modèle [10].

Nous avons fait le calcul de la valeur de contrainte et la valeur de déformation, alors nous faisons une identification élasto-viscoplastique (EVP) en utilisant le logiciel SiDoLo. Le logiciel SiDoLo permet d'identifier des modèles de comportement de différents systèmes mécaniques à l'aide d'outils présent dans SiDoLo. SiDoLo est un logiciel de simulation et d'identification qui permet de programmer simplement les équations du modèle et d'obtenir des résultats, nos éprouvettes sont identifiées pour chercher les valeurs des paramètres K_v , K_a , n , Module de Young (E) et σ_y , alors nous avons calculé les valeurs des paramètres D qui est utilisé dans la simulation numérique, comme un des paramètres de viscosité. Vous pouvez vous référer à l'annexe pour obtenir la courbe de résultat d'identification le logiciel SiDoLo.

L'équation dans du logiciel SiDoLo :

- Modèle explicite

$$Z = G(A, Y, t \dots)$$

Où ;

Variable ; $t, \varepsilon_{\theta\theta}$ connus (chargements)

$$\sigma_{zz} = \frac{-E}{\gamma} (\varepsilon_{\theta\theta} + \frac{1}{2} \varepsilon_{zz}^{vp}) \quad \text{eq. (7)}$$

- Modèle Différentiel

$$\frac{dy}{dt} = F(Y, A \dots)$$

$$F = |(\sigma_{zz})| - \sigma_y \quad \text{eq.(8)}$$

Si $F \geq 0$ alors

$$\dot{\varepsilon}_{zz}^P = \left(\frac{F}{K}\right)^n \text{sign}(\sigma_{zz}) \quad \text{eq.(9)}$$

Sinon

$$\dot{\varepsilon}^P = 0$$

$$\varepsilon^{vp} = \left(\frac{\sigma}{K(a)}\right)^n \quad \text{eq.(10)}$$

La variable de vieillissement :

$$K(a) = K_v + (K_0 - K_v)(1 - a) \quad \text{eq.(11)}$$

$$\frac{da}{dt} = \left[\frac{a^\infty(T) - a}{\tau(T)}\right] \quad \text{eq.(12)}$$

Par la suite, nous avons identifié le modèle visco plastique avec un modèle mathématique présente ci-dessous ;

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = D \left[\frac{|\sigma| - \sigma_{0(p)}}{\sigma_{0(p)}}\right]^n = \left[\frac{|\sigma| - \sigma_0}{K}\right] = \left[D^{\frac{1}{2}} \frac{|\sigma| - \sigma_0}{\sigma_0}\right]^n \quad \text{eq.(13)}$$

$$K = \frac{\sigma_y}{D^{\frac{1}{n}}} \Rightarrow D = \left(\frac{\sigma_y}{K}\right)^n \quad \text{eq.(14)}$$

Après nous avons trouvé les paramètres de modèle de Norton, et cela nous permet de connaître la valeur D que nous allons utiliser pour une vérification sur un élément dans ABAQUS. Ci-dessous nous vous présentons les résultats de l'identification en utilisant le logiciel SiDoLo :

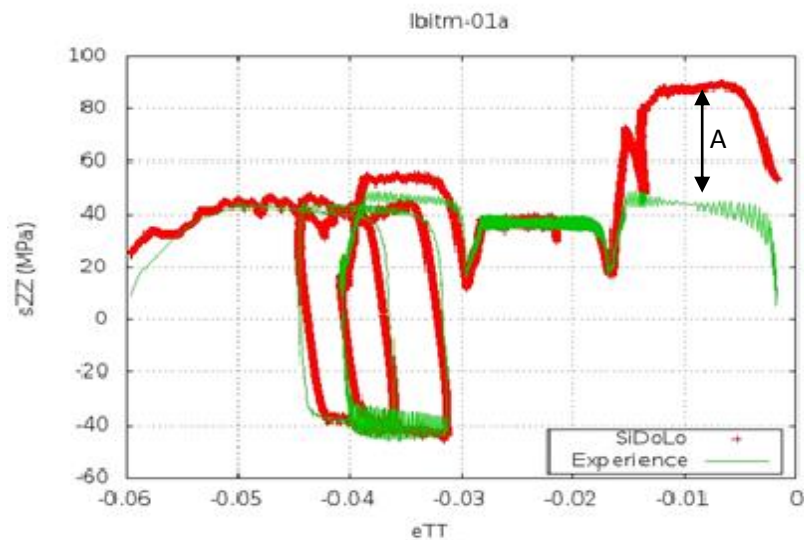


Figure 14. Comparaison les courbes de contrainte en fonction de déformation des résultats SiDoLo et expérience.

Sur la figure 14 on compare les courbes des valeurs des contraintes en fonction des déformations, la courbe rouge représenté le résultat d'identification de SiDoLo, et le courbe verte représentée de résultat de l'expérience, il y a pas égal des courbes sur la première traction, il y a le distance sur la courbe (A).

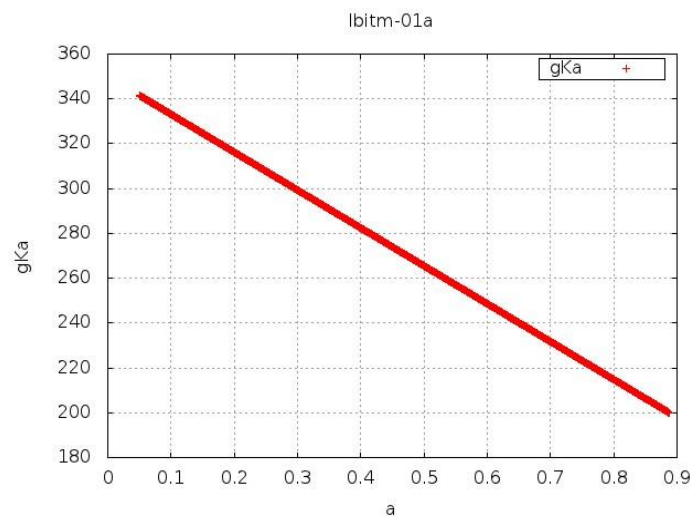


Figure 15. La courbe de Ka en fonction de a d'éprouvette Ibitm-01a
Les résultats des autres éprouvettes, sont présentés dans le tableau 4:

Tableau 4. Les résultats de SiDoLo les paramètres sans variable de vieillissement

Eprouvette	Module de Young E (MPa)	Xnu coef poisson	$Kv s^{1/n}$	n	σ_y (MPa)	D(s ⁻¹)	TC1 (°C)
Lbitm-01a	10000	0.33	181	3.4	0.1	8.39253E-12	750
Lbitm-02a	60000	0.33	195	33.8	2.5	1.11481E-64	650
Lbitm-02b	70000	0.33	181	16.8	0.1	1.86638E-55	650
Lbitm-03a	80000	0.33	191	22.8	1.2	6.27728E-51	600
Lbitm-03b	20000	0.33	181	5	0.1	5.14763E-17	750
Lbitm-05a	60000	0.33	245	97.9	24	1.67233E-99	500
Lbitm-05b	8000	0.33	171	4.1	0.1	5.55541E-14	800
Lbitm-06a	40000	0.33	181	11.8	1.1	7.04412E-27	700
Lbitm-06b	20000	0.33	171	5.5	0.1	1.65395E-18	700
Lbitm-07a	20000	0.33	181	9.8	0.1	1.18782E-32	700
Lbitm-07b	10000	0.33	181	3.9	0.12	4.01662E-13	775

Le tableau 4, regroupe les résultats d'identification de SiDoLo, En particulier les valeurs des paramètres D, et n qui sont nécessaires pour la simulation numérique en utilisant le logiciel SiDoLo. Vous pouvez vous référer à l'annexe pour obtenir le détail de l'identification par le logiciel SiDoLo.

Tableau 5. Les résultats de SiDoLo les paramètres avec variable de vieillissement

Eprouvette	Module de Young E (MPa)	Xnu coef poisson	$Ka s^{1/n}$	n	σ_y (MPa)	D (s ⁻¹)	TC1 (°C)
Lbitm-01a	10000	0.33	199.99	3.4	0.1	5.97822E-12	750
Lbitm-02a	60000	0.33	204.15	33.8	2.5	2.3663E-65	650
Lbitm-02b	70000	0.33	216.92	16.8	0.1	8.91593E-57	650
Lbitm-03a	80000	0.33	209.01	22.8	1.2	8.04495E-52	600
Lbitm-03b	20000	0.33	199.41	5	0.1	3.17150E-17	750
Lbitm-05a	60000	0.33	255.14	97.9	24	3.15544E-101	500
Lbitm-05b	8000	0.33	189.66	4.1	0.1	3.63328E-14	800
Lbitm-06a	40000	0.33	199.37	11.8	1.1	2.25138E-27	700
Lbitm-06b	20000	0.33	190.59	5.5	0.1	9.10855E-19	700
Lbitm-07a	20000	0.33	205.92	9.8	0.1	3.35548E-33	700
Lbitm-07b	10000	0.33	199.34	3.9	0.12	2.75669E-13	775

Le tableau 5 présente les résultats d'identification de SiDoLo, pour le cas avec une variable de vieillissement.

2.4.2 Validation Loi de Comportement avec ABAQUS (Un élément)

Pour la validation par calcul élément fini, on utilise, d'abord un élément 2D (de type CAX4 sous ABAQUS), puis un élément 3D (de type C3D8).

Tableau 6. Etat de vieillissement

Eprouvette	TC1 (°C)	La valeur de variable de vieillissement (a)	Etat de vieillissement	Validation Un Elément
Lbitm-01a	750	0.88766	Oui	Valide
Lbitm-02a	650	0.94094	Oui	Non valide
Lbitm-02b	650	0.78745	Oui	Non valide
Lbitm-03a	600	0.88671	Oui	Non valide
Lbitm-03b	750	0.89104	Oui	Valide
Lbitm-05a	500	0.90340	Oui	Non valide
Lbitm-05b	800	0.89577	Oui	Valide
Lbitm-06a	700	0.89129	Oui	Valide
Lbitm-06b	700	0.89056	Oui	Valide
Lbitm-07a	700	0.85255	Oui	Valide
Lbitm-07b	775	0.89150	Oui	Valide

Sur le tableau 6. est les résultats de dans un élément que nous avons mettre les résultats d'identification des paramètres du modèle de Norton. On peut trouver nos éprouvettes n'était pas marche dans logiciel ABAQUS des éprouvettes lbitm-02a, lbitm-02b, lbitm-03a, et lbitm-05a car minimum réel de ABAQUS de 10^{-38} et plus petit les valeurs que utiliser les résultats de identification. Vous pouvez vous référer à l'annexe pour obtenir la courbe de résultat de simulation numérique un élément.

2.5 Essais Anisothermes

Nous avons fait un essai Gleeble, anisotherme à des températures comprises entre 600 °C – 800 °C pour valider le modèle, L'éprouvette s'appelle lbitm-08 ;

Tableau 7. L'éprouvette lbitm-08

Eprouvette	Diamètre D0 (mm)	Diamètre D1 (mm)	Temps de maintien avant essais (s)	Température (°C)
Lbitm-08	9,95	10,679	10	600-800

Les résultats de l'essai Gleeble sont présentées ci-dessous ;

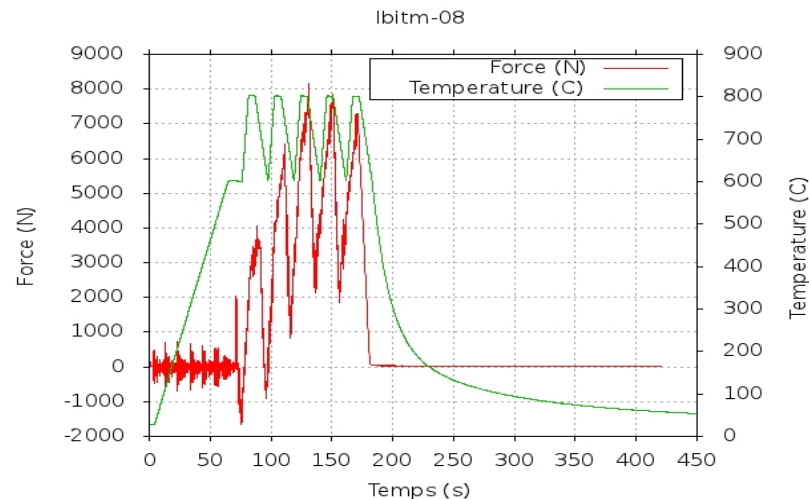


Figure 16. Les courbes de la valeur de température et la valeur de force.

La figure 16 montre les courbes des valeurs de température et des valeurs de force, mesurées au cours de l'essai. Pour cet essai, nous avons imposé 5 cycles de température entre 600°C et 800°C. En même temps, on impose un déplacement de la traverse.

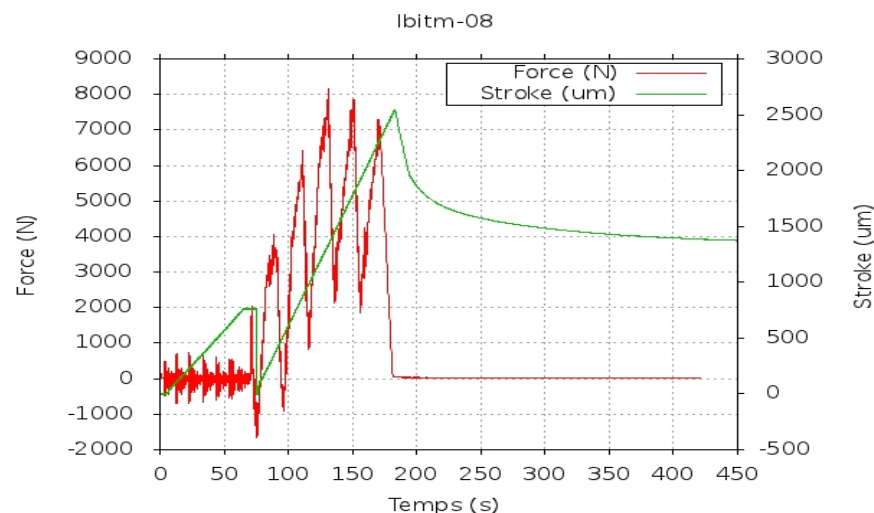


Figure 17. Les courbes des la valeur de stroke et la valeur de force.

La figure 17. représente de la valeur du déplacement de la traverse (stroke).

L'essai peut être divisé en deux parties ;

- La première correspond à la phase de chauffage (20 ° C à 600 ° C). Lors de cette étape, la machine régule à Force nulle. Le déplacement traverse observé correspond à la dilatation thermique des matériaux.

- Le second correspond à la phase de traction à température variable. Au début de cette étape ($t=70s$), on fait une mise à 0 du capteur, puis on applique un déplacement de la traverse à vitesse constante.

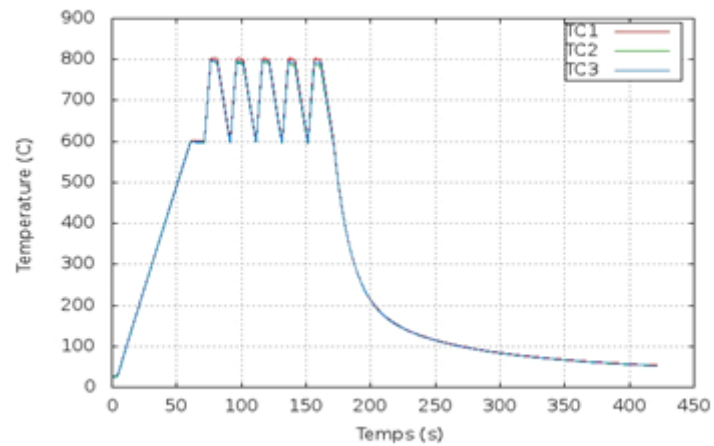


Figure 18. Les courbes de la valeur de température en fonction du temps

Nous vous présentons les températures qu'ont détecté en thermocouple que nous avons mettre sur l'éprouvette en utilisant 3 thermocouple, sur la figure montre la valeur de température des cycles étaient 600°C à 800°C .

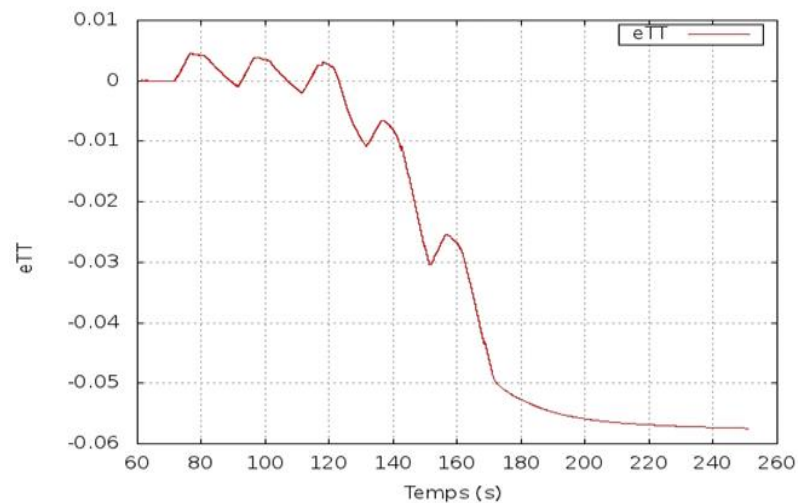


Figure 19. Les courbes de la valeur de déformation en fonction du temps.

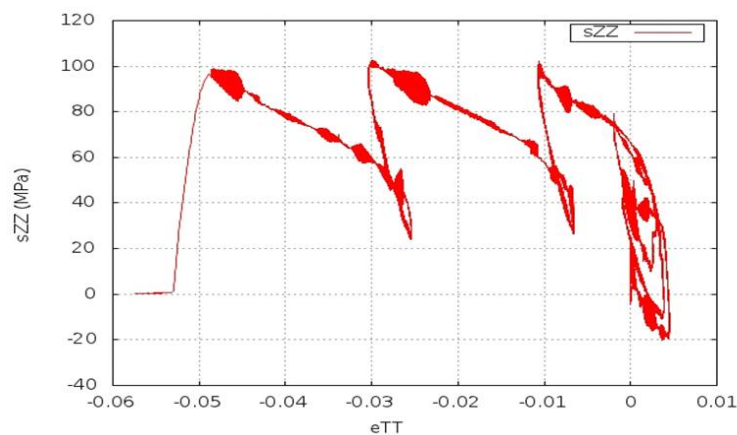


Figure 20. Les courbes de la valeur des contraintes et déformation de l'éprouvette validation.

Sur la figure 20 est représentée l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation pour une température d'essai comprise entre 600 °C et 800 °C. Les chargements commencent avoir la valeur de déformation en un premier cycle jus qu'`a troisième cycle étaient les déformations que la même valeur, pour que dans la figure montre les courbes des contraintes s'accroissent et l'écrouissage stable.

Pour les 2 premiers cycles, on est passés en compression dans la phase de chauffage. En effet, le déplacement imposé à l'éprouvette n'était pas suffisant pour compenser la dilatation thermique entre 600°C et 800°C.

2.6 Modèle Validation Anisothermes avec ABAQUS

Nous avons réalisé de la vérification un élément, pour connaître l'influence de température sur le comportement de CuCr1Zr.

a. Initial Condition

On a lancé le fichier.inp dans ABAQUS, et on vous présente le résultat dans figure 21 :

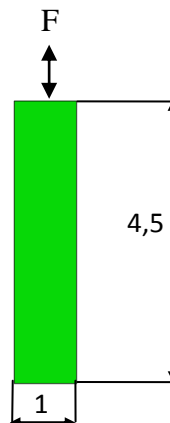


Figure 21. Vue 2D initial condition la modèle validation un élément.

Le modèle validation a une dimension 4,5 mm x 1 mm car poursuivre la distance entre thermocouple que était sur mes éprouvettes, et les chargements et température la même avec l'essai anisothermes.

b. Les résultats



Figure 22. Vue 2D l'isovaleur de déplacement 22

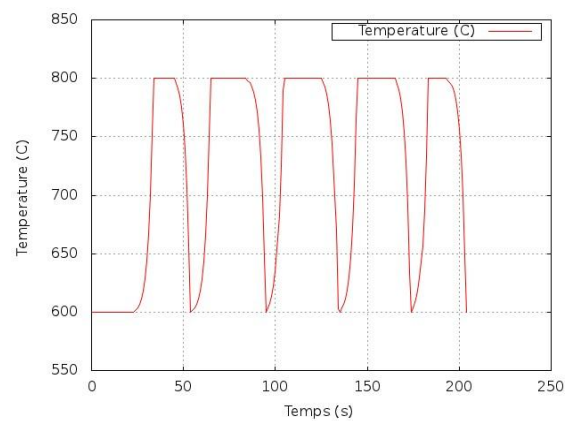


Figure 23. La Courbe de température en fonction du temps

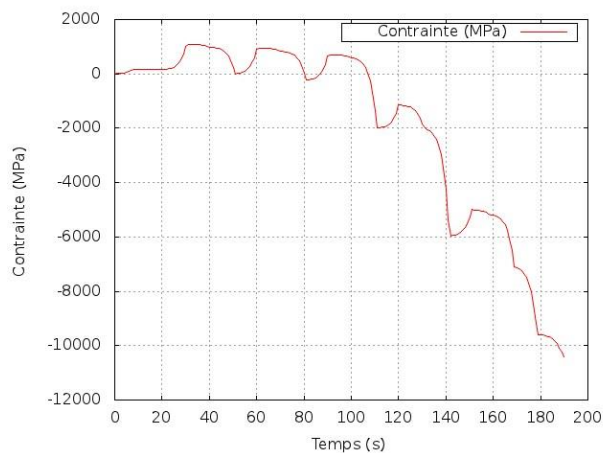


Figure 24. La Courbe de la valeur de contrainte 22 en fonction du temps.

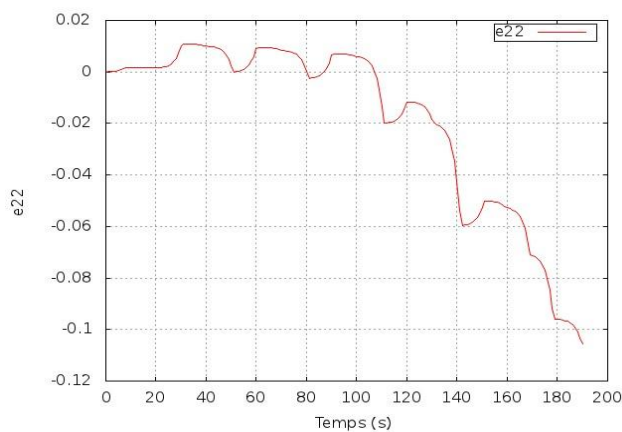


Figure 25. Les courbes de la valeur de déformation 22 en fonction du temps.

Nous vous présentons les résultats de simulation numérique en utilisant ABAQUS, la simulation a été donner les déplacements Z ($U_z = L \cdot \varepsilon_{zz}$) comme de la valeur d'expérience ($\varepsilon_{zz} \simeq -2\varepsilon_{\theta\theta}$).

c. Comparaison

Nous avons obtenu les résultats de expérience qu'on s'appelle de lbitm-08 et les résultats de simulation numérique, alors nous faisons comparer les résultats, nous vous présentons les courbes des compares ;

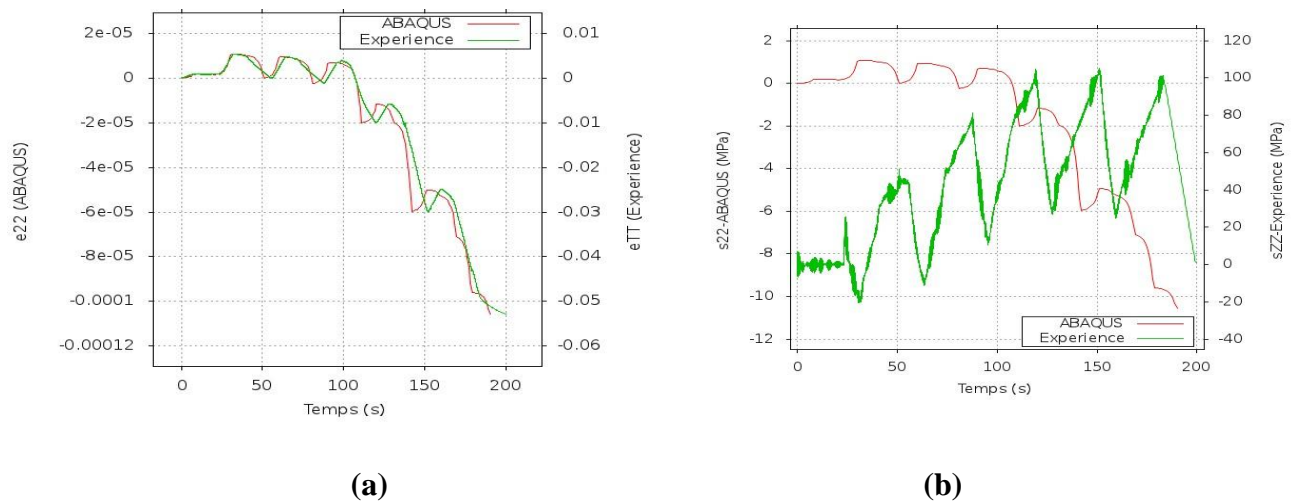


Figure 26. Les courbes de comparaison de la valeur de déformation et contrainte en fonction du temps.

Les résultats expérimentale et numérique montre le résultat sont différents, la déformation d'expérience est plus petite que la déformation dans ABAQUS et la valeur contrainte maximum d'ABAQUS est plus grand que la valeur d'expérience.

2.7 Conclusion

Essais des matériaux a été fait les essais ont isothermes et anisothermes en utilisant la machine Gleeble, la première partie de l'essai isothermes, nous avons fait 11 traitements avec l'utilisation de différentes températures et de chargement, puis être identifiés à l'aide le logiciel SiDoLo pour trouver les paramètres de Modèle Norton et le modèle le Blond-Devaux (Les variables de vieillissement). En utilisant SiDoLo nous pouvons connaître la valeur de variable de vieillissement tous éprouvettes sont la valeur entre 0-1, alors on peut dire que tous éprouvette ont été testés qui avaient le vieillissement, pour validation par calcul élément fini avec un élément utilise 2D (de Type CAX4) et 3D (de type C3D8). On a trouvé just 7 éprouvette qu'à bien passe dans ABAQUS car minimum réel d'ABAQUS de 10^{-38} et plus petit les valeurs qu'utiliser les résultats d'identification.

Deuxième partie, nous ont fait l'essai isothermes que nous imposées 5 cycles de température entre 600°C et 800°C.

Modèle un essai cyclique dans ABAQUS est la comparaison d'essai anisothermes, nous faisons des comparaisons les résultats expérience et numérique qu'a été donner les déplacements et la température la même, les résultats expérimentale et numérique montre le résultat sont différents, la déformation d'expérience est plus petite que la déformation dans ABAQUS et la valeur contrainte maximum d'ABAQUS est plus grande que la valeur d'expérience.

CHAPTIRE III

Modélisation contact électrode – tôle

Introduction

Dans cette partie, on souhaite comparer deux logiciels de calculs aux éléments finis : ABAQUS et SYSWELD. On s'intéresse ici à la modélisation du contact entre la surface active d'une électrode et une tôle.

3.1 Modèle Elastique

Dans un premier temps, on effectue cette comparaison pour un modèle mécanique très simple dans les électrodes et dans les tôles: modèle élastique.

3.1.1 Modèle ABAQUS

On modélise la phase d'accostage où il n'y a pas de variations de températures.

a. Condition initial

Tableau 8. Les propriétés du matériau

Matériau	E Module de Young (MPa)	Coefficient de Poisson	Coefficient de Frottement	Température (°C)
Electrode	89000	0,33	0,2	20
Tôle	200000	0,3	0,2	20

Le tableau 8 montre les paramètres des propriétés des matériaux pour le calcul par éléments finis. Après avoir mis les paramètres de propriétés de matériau dans le fichier.inp, nous pouvons faire le calcul dans ABAQUS, le fichier.inp peut être vu dans les annexes. Nous vous présentons le maillage initial en figure 27:

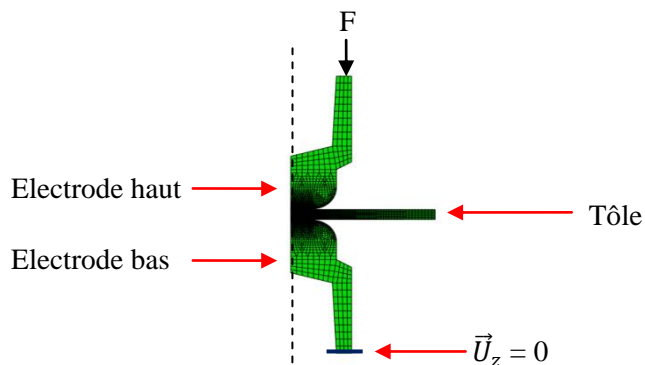


Figure 27. Vue 2D Modélisation contact électrode et tôle ABAQUS.

b. Les Maillages

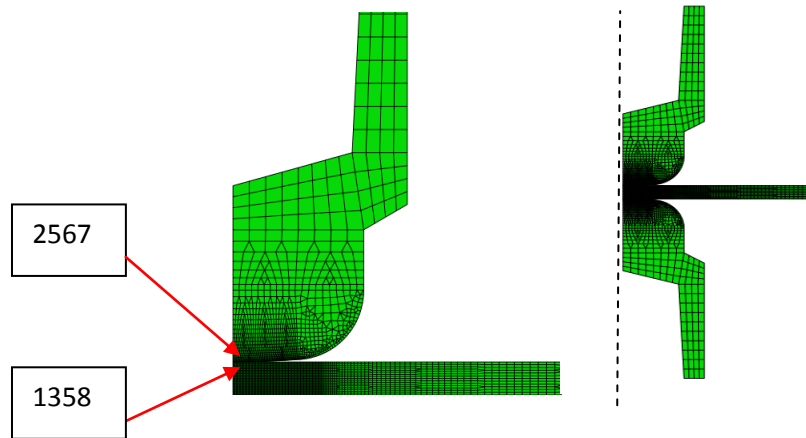


Figure 28. Vue 2D les maillages ABAQUS.

La figure 28 est un zoom de la zone de contact entre la tôle et l'électrode du haut. On a choisi une maille dans l'électrode (2567) et une maille dans la tôle (1358) pour présenter les résultats, et ensuite les comparer avec SYSWELD.

3.1.1.1 Le contact avec frottement

Pour cette simulation, on applique une force de -2100 N en 0,1s, ce qui correspond à la phase d'accostage 1 cycle de soudage par point. On utilise un modèle avec frottement au niveau du contact électrode-tôle, la valeur du coefficient de frottement est de 0,2.

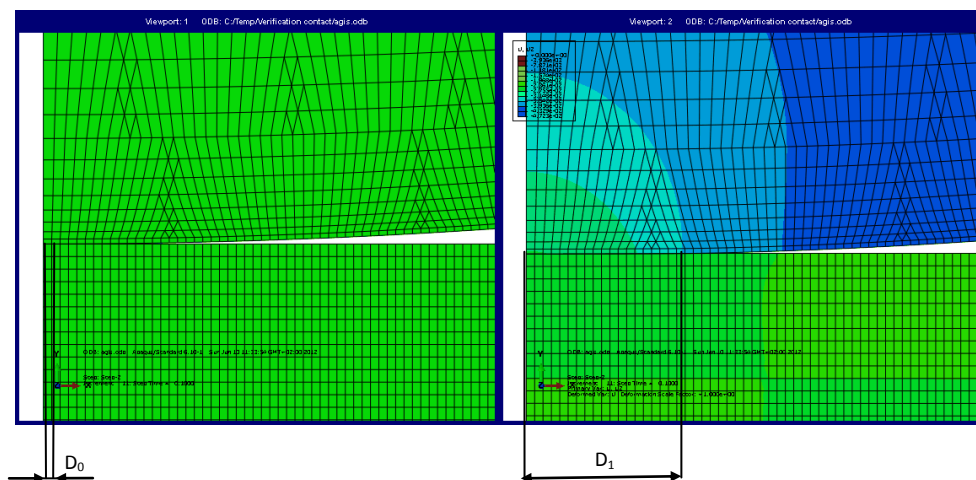


Figure 29. Vue 2D du maillage déformé.

Dans cette simulation, nous pouvons observer les valeurs des déformations qui se produisent après le chargement. Sur la figure 29 à gauche, il n'y a pas eu de déformation, le maillage est dans son état-initial. Le symbole Do est utilisé comme rayon de contact de référence. Il représente les mailles de l'électrode et la tôle en contact. Puis la figure 23 à droite utilise le symbole D1, à savoir la distance de la déformation qui a eu lieu après chargement. Sur la condition initiale du maillage en contact autant que un seul nœud en contact, et après le chargement du maillage en contact autant que 18,5 mailles.

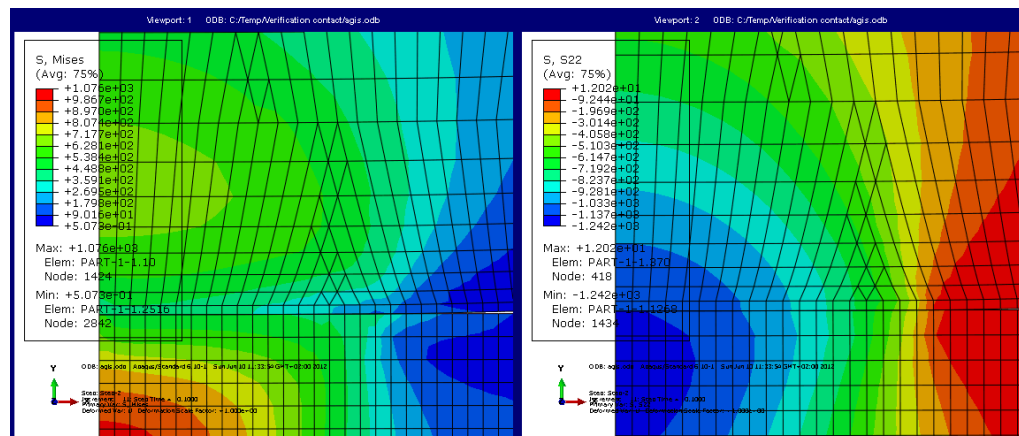


Figure 30. Vue 2D les contraintes von mises et les contraintes 22.

La figure 30 représente les isovaleurs de valeur des contraintes au temps $t=0,1s$. A gauche, on a les isovaleurs de la contrainte de Von Mises et à droite contraintes de l'orientation 22. Puis nous prenons une maille en contact entre l'électrode et le tôle pour connaître les valeurs de déformations et de contraintes, dans l'électrode on a choisi la maille 2567 et dans la tôle on a choisi la maille 1358. Ci-dessous nous vous présentons dans le tableau les résultats de calcul dans ABAQUS sur une maille ;

Tableau 9. Les résultats de calcul élastique avec frottement dans ABAQUS

Partie	N° Maille	Pressure/Force	Contrainte 22 (MPa)	Deformation 22
Electrode	2567	23,873 MPa	-969.5	-6.0928E-03
Tôle	1358	23,873 MPa	-988.9	-3.3939E-03
Electrode	2567	-2100 N	-969.0	-6.0928E-03
Tôle	1358	-2100 N	-988.7	-3.3939E-03

Les résultats des calculs du maillage dans électrode et tôle, on a lancé les changements de force ou pressure, afin que nous pouvons voir les résultats de contrainte et déformation dans ABAQUS.

3.1.1.2 Le contact sans le frottement

Pour cette simulation, on applique une force de -2100 en 0,1s, ce qui correspond à la phase d'accostage 1 cycle de soudage par point. On utilise un modèle sans frottement au niveau du contact électrode-tôle.

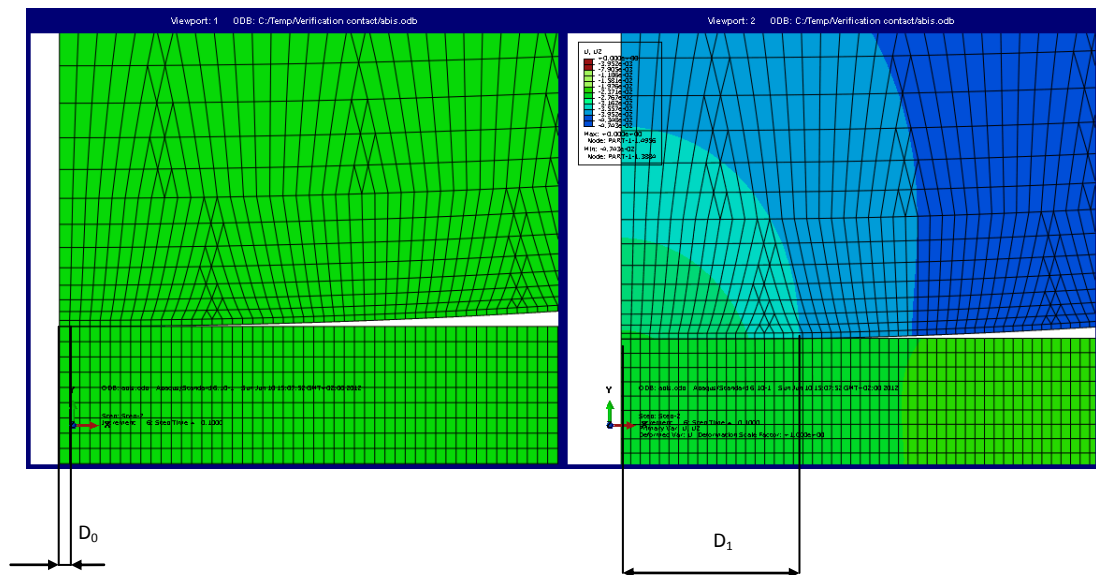


Figure 31. Vue 2D du maillage déformé sans le frottement.

Nous pouvons observer les isovaleurs des déformations qui se produisent après le chargement, sur la figure de droite, on observe le maillage initial qui n'a pas subi de déformation. Le symbole D_0 est utilisé comme rayon de référence

avant application du chargement, puis la figure de gauche représente le symbole D1, à savoir le rayon de contact après chargement.

Initialement, il y a qu'un seul nœud en contact (de 50 μm) en contact. En fin de calcul, il y en a 18,5.

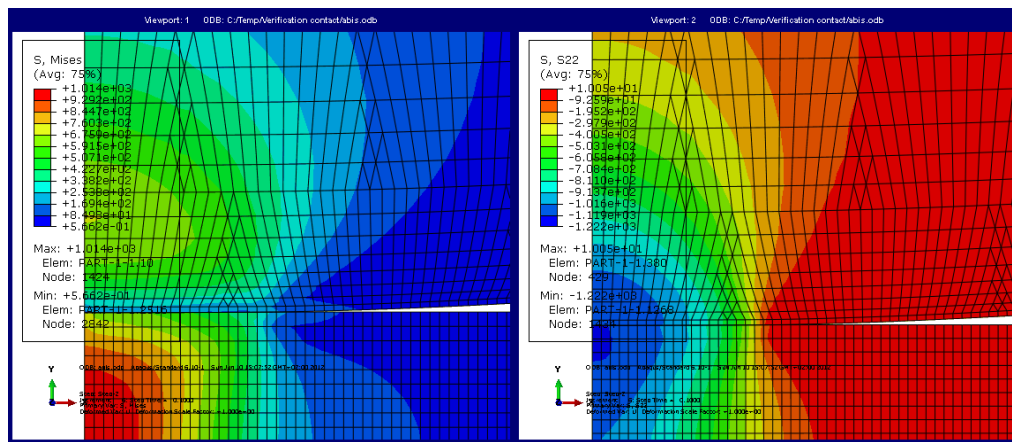


Figure 32. Vue 2D les contraintes von mises et contraintes 22 sans le frottement.

La figure 32 présente l'isovaleur de contraintes après le calcul qui n'a pas utilisé de valeur de frottement, à gauche on a l'évolution de zone contrainte de Von Mises et à droite les contraintes de l'orientation 22, et puis nous prendrons une maille qui était en contact entre électrode et tôle pour connaître la valeur de déformation et la valeur de contrainte, en électrode on a choisi 2567 et en tôle on a choisi 1358, ci-dessous nous vous présentons sur tableau le résultat de calcul dans ABAQUS un maille ;

Tableau 10. Le résultat de calcul sans frottement ABAQUS

Partie	N° Maille	Pressure/Force	Contrainte 22	Déformation 22
Electrode	2567	-23,89 MPa	-970.6	-5.1210E-03
Tôle	1358	-23,89 MPa	-967.0	-3.6285E-03
Electrode	2567	2100 N	-970.6	-5.1209E-03
Tôle	1358	2100 N	-967.0	-3.6284E-03

Les résultats des calculs du maillage dans électrode et tôle, on a lancé les changements de force ou pression, afin que nous pouvons voir les résultats de contrainte et déformation dans ABAQUS.

3.1.1.3 Comparaison calculs ABAQUS avec et sans frottement

Modélisation dans ABAQUS pour le calcul Elastique, les résultats de calculs dans ABAQUS avec et sans frottement pour l'électrode montre la valeur de contrainte et la valeur de déformation pas beaucoup différents (Cf:Tableau 9 & 10).

3.1.2 Modèle SYSWELD

L'objectif est réaliser le même calcul avec le logiciel SYSWELD. On utilise donc les mêmes propriétés matériaux et le même maillage. Dans cette partie, on présente uniquement les résultats pour un calcul « sans frottement ». En effet, le cas avec frottement (coefficient de 0,2) diverge.

a. Condition initial

Tableau 11. Les propriétés du matériau

Matériau	E Module de Young (MPa)	Coefficient de poisson	Température (°C)
Electrode	89000	0,33	20
Tole	200000	0,3	20

Le tableau montre les paramètres des propriétés du matériau pour le calcul par éléments finis. Après avoir mis les paramètres des propriétés dans le fichier.DAT, nous pouvons faire le calcul dans SYSWELD.

b. Les Maillages

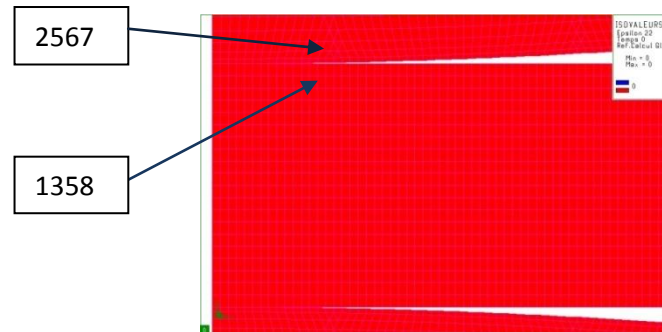


Figure 33. Vue 2D les maillages élastique SYSWELD.

Les maillages de modèle dans SYSWELD et sur la figure 33, agrandir le modèle que montre le contact électrode et tôle, on a choisi un maille du électrode et un maille du tôle, le maille du électrode que représente le maille de 2567 et le maille du tôle que représente le maille de 1358.

3.1.2.1 Le contact sans le frottement

Dans SYSWELD, pour de raison de convergence du calcul, on applique une pression équivalente à -2100 N ($P = \frac{F}{s} = \frac{-2102}{(8^2-6^2)\pi} = -23,87 \text{ MPa}$). Le modèle au niveau du contact est un modèle « collant » (coefficient de frottement infini).

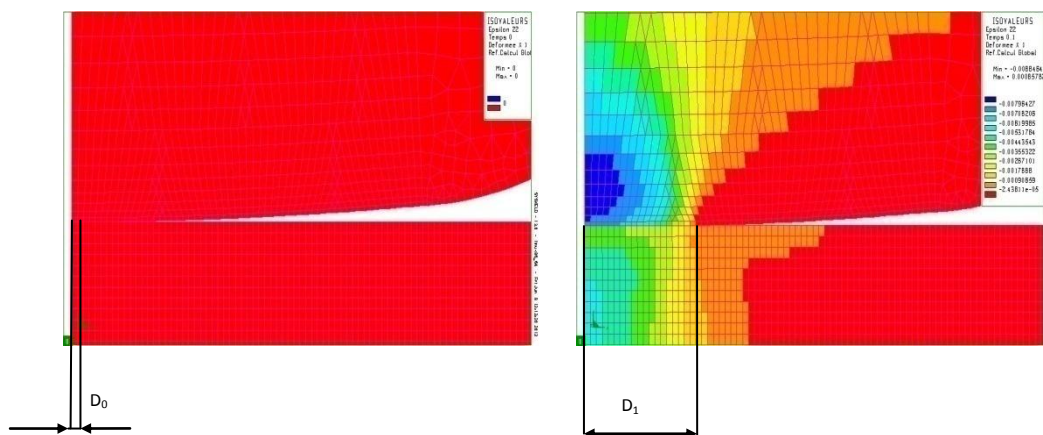


Figure 34. Vue 2D déformation élastique SYSWELD.

Dans cette simulation a été fait, nous pouvons observer les valeurs des déformation qui se produisent après les chargements, sur la figure droite est l'état initial dans le quel la déformation a pas eu lieu, le symbole Do est utilisé comme de référence au début de mailles d'électrode et tôle qui a établi un contact, et puis la figure à la gauche de l'utilisation du symbole D1 à savoir la distance de la déformation a eu lieu après chargements. Sur la condition initiale du maillage en contact autant que un seul nœud en contact, et après le chargement des maillages en contact autant que 18 mailles.

Tableau 12. Le résultat de calcul sans frottement SYSWELD.

Partie	N° Maille	Contrainte 22 (MPa)	Déformation 22
Electrode	2567	-979,049	-0,00617625
Tôle	1358	-985,018	-0,00337516

3.1.3 Comparaison des résultats élastique des ABAQUS et SYSWELD

a. Comparaison du calcul sans frottement dans l'électrode

Après avoir effectué la simulation avec ABAQUS et SYSWELD, on obtient les résultats de ces simulations, puis nous comparons les résultats. Ci-dessous nous vous présentons les résultats de comparaison entre des 2 calculs ABAQUS et SYSWELD, dans le cas sans frottement. Le tableau 13 présente des droites de contraintes en fonction des déformations (car modèle élastique).

Tableau 13. Comparaison des résultats élastique des ABAQUS et SYSWELD

Logiciel	Partie	N° Maille	Contrainte 22 (MPa)	Déformation 22
ABAQUS	Electrode	2567	-970,6	-0,0051210
SYSWELD	Electrode	2567	-979,049	-0,00617625
ABAQUS	Tôle	1358	-967,0	-0,0036285
SYSWELD	Tôle	1358	-985,018	-0,00337516

Les résultats de la comparaison que nous obtenons, nous pouvons observer sur le tableau 13, les résultats d'ABAQUS et SYSWELD que sont pas beaucoup différent, la valeur de contrainte SYSWELD est plus petite que la valeur

d'ABAQUS et la valeur de déformation d'ABAQUS est plus petite que la valeur de SYSWELD.

b. Le contact avec le frottement

Pour comparer les résultats de SYSWELD et ABAQUS que être donner la variable de frottement, nous ne pouvons pas comparaison car le calcul dans SYSWELD ne passe pas lorsque nous avons ajouté du frottement.

3.2 Modèle Thermo-Elastique

Maintenant, on souhaite comparer les 2 logiciel sur un cas un peu plus compliqué. Cette fois-ci, nous allons modéliser toutes les étapes d'un cycle de soudage ; accostage, soudage, forgeage, et refroidissement (Cf:Figure 1). Il est donc nécessaire d'utiliser une loi thermo-élastique pour ce modèle.

3.2.1 Modèle ABAQUS

a. Condition initial

Tableau 14. Les propriétés du matériau.

Matériau	E Module de Young (MPa)	Coefficient de Poisson	Coefficient de Frottement	Température (°C)
Electrode	90000	0,34	0,2	20
	40000	0,37	0,2	700
Tôle	370000	0,29	0,2	20
	100000	0,29	0,2	1000

Le tableau montre les paramètres des propriétés des matériaux pour le calcul aux éléments finis. Après avoir mis les paramètres de propriétés du matériau dans fichier.inp, alors nous pouvons faire le calcul dans ABAQUS, le fichier.inp peut être vu dans l'annexe. Nous vous présentons le maillage initial à la figure 35. Dans cette simulation, il n'y a qui un contact électrode/tôle.

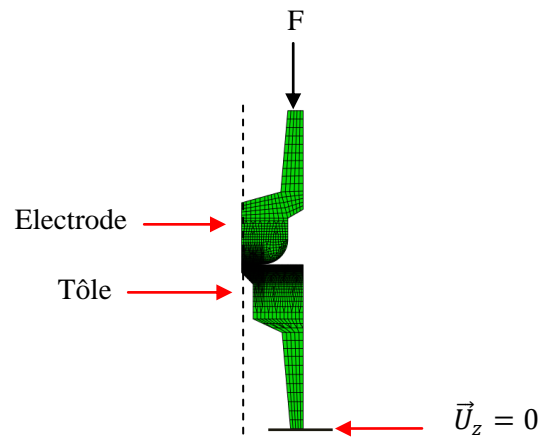


Figure 35. Vue 2D la condition initial de la modèle thermo-élastique dans ABAQUS.

b. Les Maillages

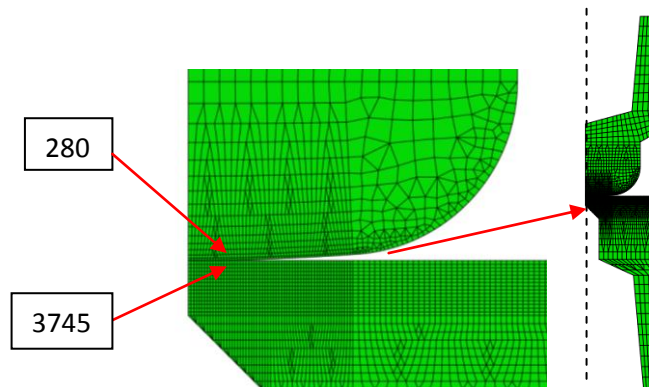


Figure 36. Vue 2D les maillages du modèle ABAQUS

Les maillages de modèle dans ABAQUS sur la figure 36, agrandir le modèle que montre le contact face active électrode et tôle, on a choisi un maille du électrode et un maille du tôle, le maille du électrode que représente le maille de 280 et le maille du tôle que représente le maille de 3745.

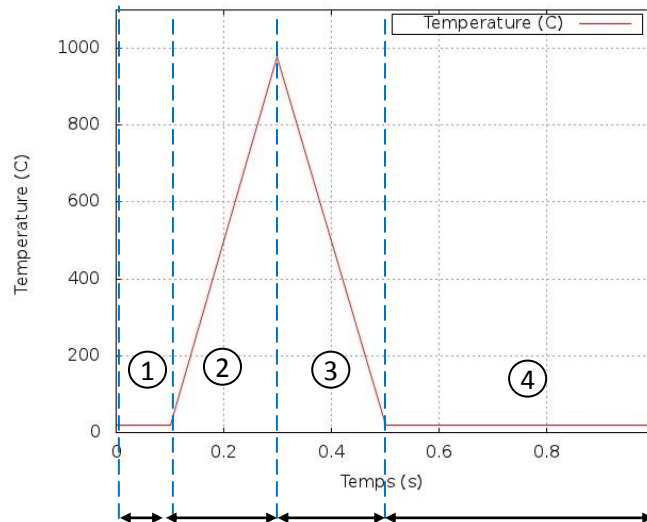


Figure 37. La courbe d'illustration de chargement de température sur la modèle thermo-élastique.

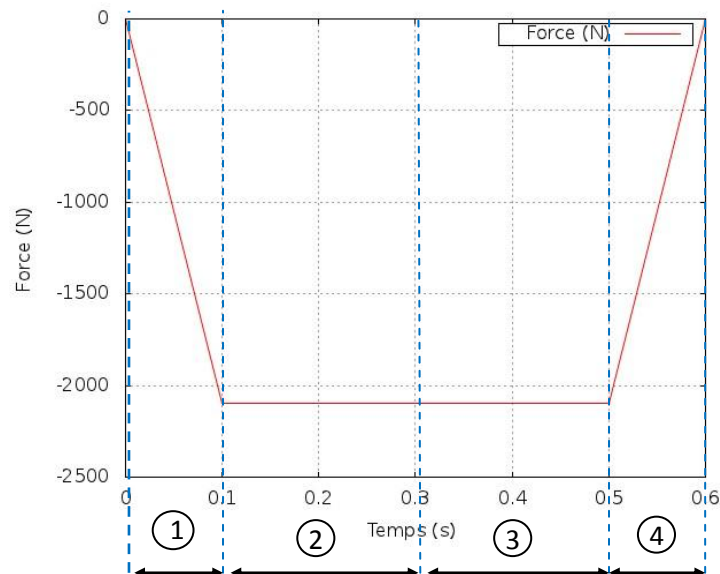


Figure 38. La courbe d'illustration de chargement de force sur la modèle thermo-élastique.

La figure 38 est une illustration de chargement de la température sur le processus un cycle du soudage; 1). accostage, 2).soudage, 3). forgeage et 4). refroidissement (Cf : Figure 1), la début à 20 ° C pendant accostage au temps 0,1 s et la force en cours diminué de 0 N à -2100 N, la température au cours du processus de soudage augmentation de la température de 20 ° C à 970 ° C au temps

de 0,2 s à 0,3 s et la force constant de -2100 N, puis la température est diminuée à 20 °C en cours la processus de forgeage au temps de 0,3 à 0,5 s et la force constante de -2100 N, et la température reste de 20°C au temps de 0,5 à 1,2 s, qui est un procédé de refroidissement et la force augmente de -2100 N à 0 N.

3.2.1.1 Le contact avec le frottement

La simulation réalisée à utilisant de chargement Force = -2100 quand était soudage et en utilisant l'influence du frottement entre l'électrode et tôle 0.2, nous pouvons montrer les résultats de la simulation comme suit;

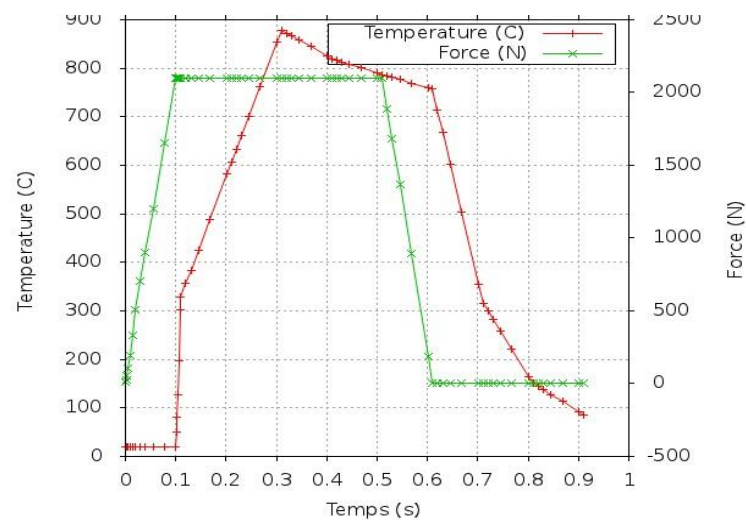


Figure 39. La courbe de température et réaction de force dans ABAQUS

La courbe ci-dessus montre le chargement de la température et force sur le processus un cycle du soudage quand le processus de soudage (0,31s), on a choisi un nœud 352 d'un maille de tôle (280), le force de 2100 N et température 878,1 °C.

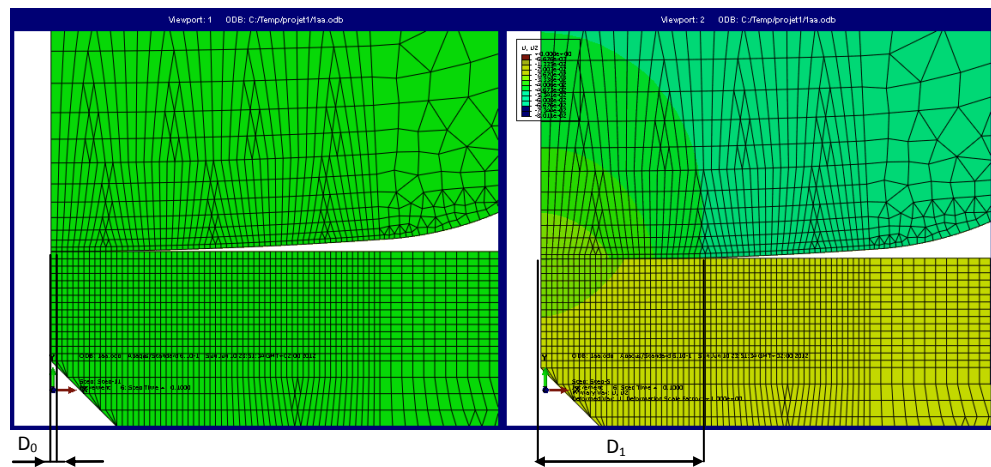


Figure 40. Vue 2D du maillage déformé de modèle ABAQUS avec frottement

Dans cette simulation a été fait, nous pouvons observer les valeurs des déformation qui se produisent après les chargements, sur la figure gauche est l'état initial dans le quel la déformation a pas eu lieu, le symbole D_0 est utilisé comme de référence au début de mailles d'électrode et tôle qui a établi un contact, et puis la figure droite de l'utilisation du symbole D_1 à savoir la distance de la déformation a eu lieu après chargements. Sur la condition initiale du maillage en contact autant que un seul un nœud en contact, et après le chargement du maillage en contact autant que 25 mailles.

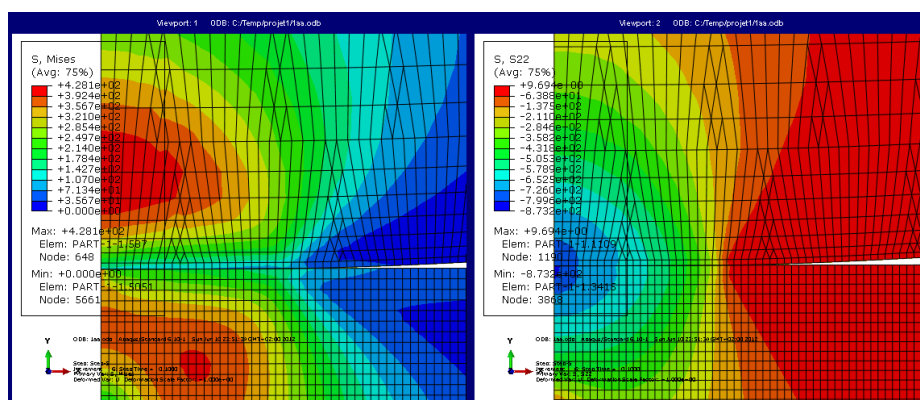


Figure 41. Vue 2D les contraintes von mises et les contraintes 22 dans ABAQUS avec frottement.

Sur la figure 41 est l'isovaleur de valeur des contraintes de l'affaire, indiquent l'évolution de zone contrainte de von mises et contrainte 22, et puis

nous prendrons une maille que était contacter entre électrode et tôle pour connaitre la valeur déformation et la valeur contrainte ,en électrode on a choisi de 280 et en tôle on a choisi 3745, ci-dessous nous vous présentons sur tableau le résultat de calcul dans ABAQUS un maille:

Tableau 15. Les résultats de calcul thermo-élastique ABAQUS avec frottement

Matériau	N° Maille	Pressure/Force	Temps (s)	Température (°C)	Contrainte 22 (MPa)	Déformation 22
Electrode	280	-2100 N	0,31	878 ,1	-240,0	-2,5248e-03
Tôle	3745	-2100 N	0,31	970 ,8	-226,2	-1,3642e-03
Electrode	280	23,87 MPa	0,31	878,1	-239,9	-2,5163e-03
Tôle	3745	23,87 MPa	0,31	970,8	-226,2	-1,3657e-03

Dans le tableau ci-dessus montre les résultats des calculs dans ABAQUS quand était le processus de soudage, actuel a été sélectionné un maille de 280 sur la face active électrode et un maille de 3745(Cf :Tableau 15), le changement de force et le pressure que montre les résultats la même.

3.2.1.2 Le contact sans le frottement

La simulation réalisée à utilisant de chargement force = -2100 N quand était le processus de soudage (0,31s) et n'a pas utilise l'influence du frottement entre face active l'électrode et tôle, nous pouvons montrer les résultats de la simulation comme suit:

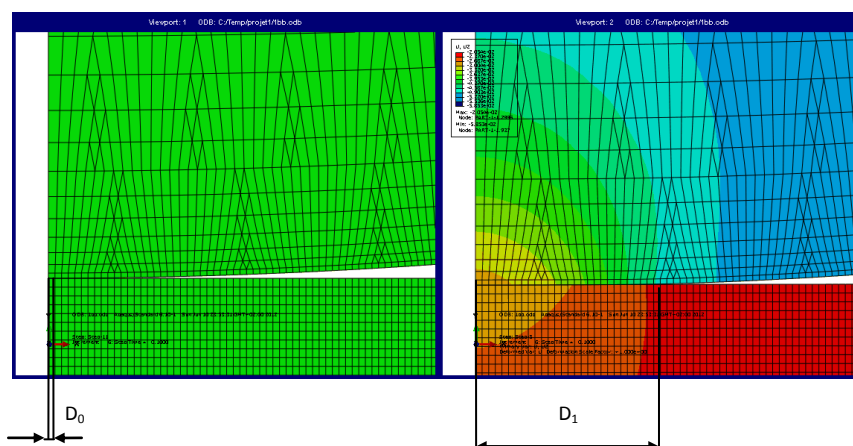


Figure 42. Vue 2D du maillage déformé sans le frottement dans ABAQUS

Dans cette simulation a été fait, nous pouvons observer les valeurs des déformation qui se produisent après les chargements, sur la figure gauche est l'état initial dans le quel la déformation a pas eu lieu, le symbole Do est utilisé comme de référence au début de mailles d'électrode et tôle qui a établi un contact, et puis la figure droite de l'utilisation du symbole D1 à savoir la distance de la déformation a eu lieu après chargements. Sur la condition initiale du maillage en contact autant que un seul nœud en contact, et après le chargement du maillage en contact autant que 24 mailles.

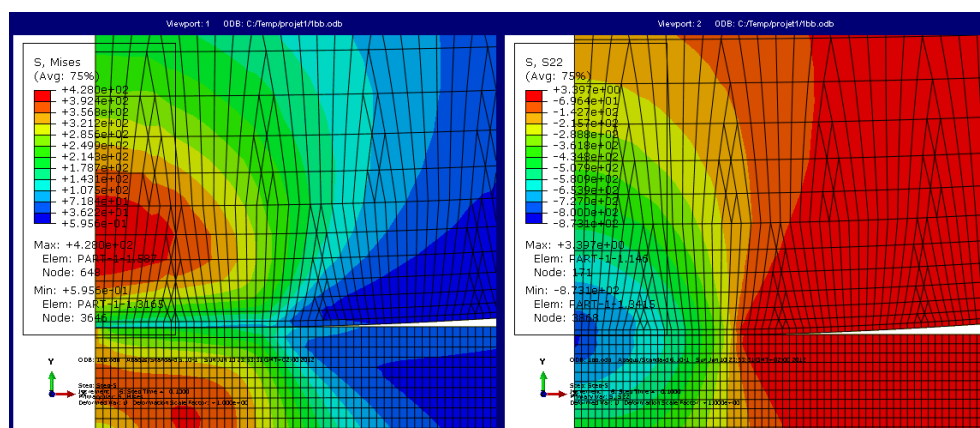


Figure 43. Vue 2D les contraintes von mises et les contraintes 22 sans le frottement dans ABAQUS.

Sur la figure 43 est l'isovaleur de valeur des contraintes de l'affaire sans frottement, indiquent l'évolution de zone contrainte de von mises et contrainte 22, et puis nous prendrons une maille que était contacter entre électrode et tôle pour connaître la valeur déformation et la valeur contrainte, en électrode on a choisi de 280 et en tôle on a choisi 3745, ci-dessous nous vous présentons sur tableau le résultat de calcul dans ABAQUS un maille:

Tableau 16. Les résultats de calcul thermo-élastique ABAQUS sans frottement au temps 0,31s

Matériau	N° Maille	Pressure/Force	Temps (s)	Température (°C)	Contrainte 22 (MPa)	Déformation 22
Electrode	280	-2100 N	0,31	878 ,1	-240,1	-2,6623e-03
Tôle	3745	-2100 N	0,31	970 ,8	-228,7	-1,3440e-03
Electrode	280	23,87 MPa	0,31	878,1	-240,1	-2,6618e-03
Tôle	3745	23,87 MPa	0,31	970,8	-228,7	-1,3440e-03

Dans le tableau ci-dessus montre les résultats des calculs dans ABAQUS quand était le processus de soudage (0,31s), actuel a été sélectionné un maille de 280 sur la face active électrode et un maille de 3745(Cf:Tableau 16), le changement de force et le pressure que montre les résultats la même. Et on a modifié le temps dans ABAQUS pour comparer avec les résultats de SYSWELD.

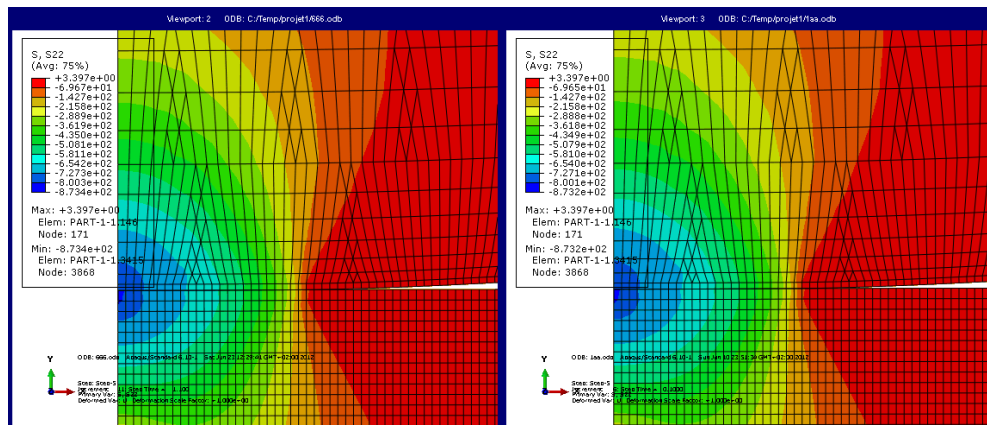


Figure 44. Vue 2D les contraintes 22 sans le frottement de modèle ABAQUS au temps 0,31s et 3,1s

Sur la figure 44 est l'isovaleur de valeur des contraintes de l'affaire sans frottement, indiquent l'évolution de zone contrainte 22 au temps 0,31s et au temps 3,1s, et puis nous prendrons une maille que était contacter entre électrode et tôle pour connaître la valeur déformation et la valeur contrainte, en électrode on a choisi de 280 et en tôle on a choisi 3745, ci-dessous nous vous présentons sur tableau le résultat de calcul dans ABAQUS un maille:

Tableau 17. Les résultats de calcul thermo-élastique sans frottement ABAQUS au temps 3,1s

Matériau	N° Maille	Force	Temps (s)	Température (°C)	Contrainte 22 (MPa)	Déformation 22
Electrode	280	-2100	3,1	878,1	-240,1	-2,6619e-03
Tôle	3745	-2100	3,1	970,8	-228,7	-1,3440e-03

Dans le tableau ci-dessus montre les résultats des calculs dans ABAQUS quand était le processus de soudage (3,1s), actuel a été sélectionné un maille de 280 sur la face active électrode et un maille de 3745(Cf :Tableau 17). Les résultats de calcul dans ABAQUS en utilisant le chargement force et pressure est la même, et les résultats au temps 0,31s et 3,1s la même aussi.

3.2.2 Modèle SYSWELD

Calculs éléments finis, pour connaître la valeur thermo-élastique du matériau, nous faisons la modélisation dans logiciel SYSWELD, afin que nous puissions connaître la précision de la loi de comportement du matériau.

a. Condition initial

Tableau 18. Les propriétés du matériau dans SYSWELD

Matériau	E Module de Young (MPa)	Coefficient de Poisson	Coefficient de Frottement	Température (°C)
Electrode	90000	0,34	0,2	20
	40000	0,37	0,2	700
Tôle	370000	0,29	0,2	20
	100000	0,29	0,2	1000

Sur le tableau ci-dessus, montre les paramètres des propriétés du matériau pour calcul les éléments finis, après avoir mis les paramètres de propriétés du matériau dans fichier.inp, alors nous pouvons faire le calcul dans SYSWELD, à fichier.inp peut être vu dans l'annexe. Nous vous présentons les résultats de calcul la condition initiale dans isovaleur suivant:

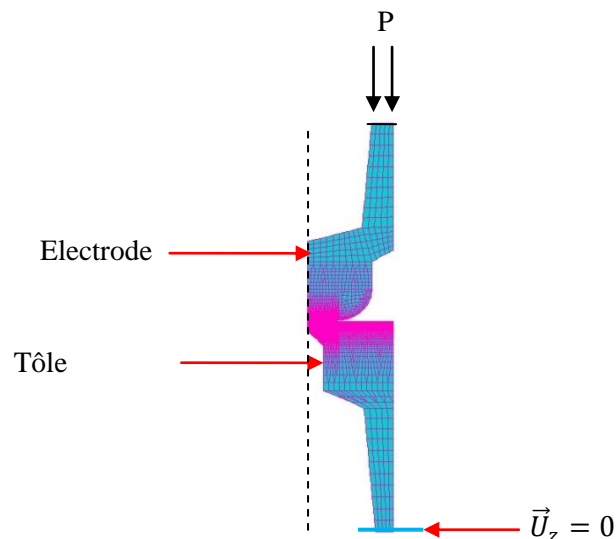


Figure 45. Vue 2D modélisation contact électrode et tôle thermo-élastique SYSWELD

b. Les Maillages

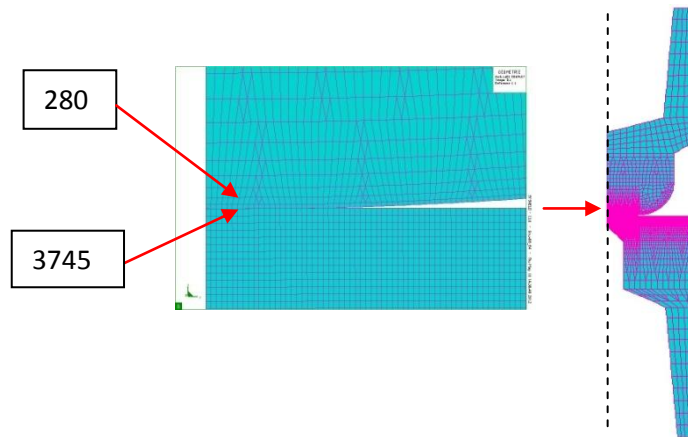


Figure 46. Vue 2D les maillages thermo-élastique SYSWELD.

Les maillages de modèle dans SYSWELD sur la figure 46, agrandir le modèle que montre le contact électrode et tôle, on a choisi un maille du électrode et un maille du tôle, le maille du électrode que représente le maille de 280 et le maille du tôle que représente le maille de 3745.

3.2.2.1 Le contact sans le frottement

La simulation réalisée à utilisant de chargement présure = $-23,87$ MPa pour 3,1 s et n'a pas utilise l'influence du frottement entre l'électrode et tôle, nous pouvons montrer les résultats de la simulation comme suit:

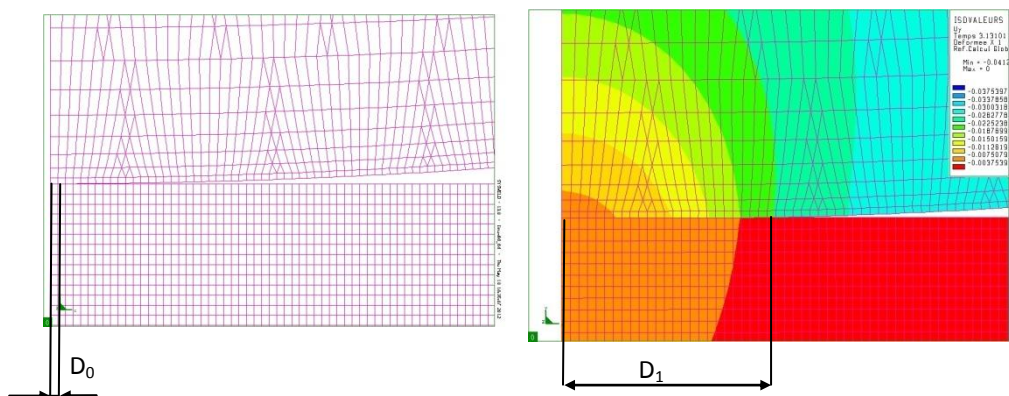


Figure 47. Vue 2D les maillages déformé la modèle thermo élastique SYSWELD

Dans cette simulation a été fait, nous pouvons observer les valeurs des déformation qui se produisent après les chargements, sur la figure droite est l'état initial dans le quel la déformation a pas eu lieu, le symbole Do est utilisé comme de référence au début de mailles d'électrode et tôle qui a établi un contact, et puis la figure à la gauche de l'utilisation du symbole D1 à savoir la distance de la déformation a eu lieu après chargements. Sur la condition initiale du maillage en contact autant que un seul nœud en contact, et après le chargement du maillage en contact autant que 26 mailles.

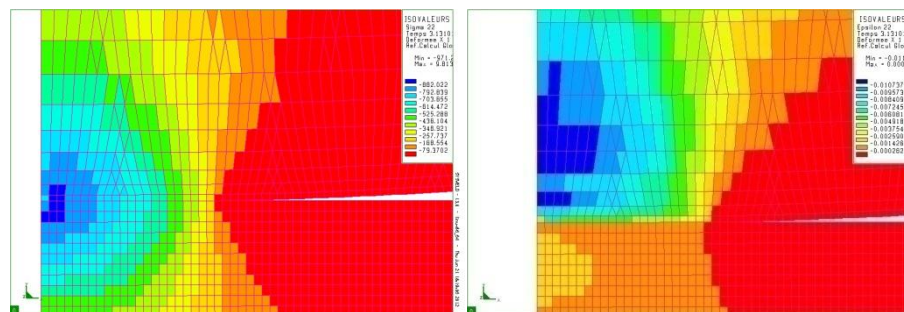


Figure 48. Vue 2D les isovaleurs des contrainte 22 et déformation22 de thermo-élastique SYSWELD sans frottement

Tableau 19. Les résultats de calcul sans frottement SYSWELD

Partie	N° Maille	Pressure (MPa)	Temps (s)	Contrainte 22 (MPa)	Déformation 22
Electrode	280	-23,87	3,1	-77,8138	7,22368E-06
Tôle	3745	-23,87	3,1	-71,5543	-6,82833E-05

Dans le tableau ci-dessus montre les résultats des calculs dans SYSWELD quand était le processus de soudage (3,1s), actuel a été sélectionné un maille de 280 sur la face active électrode et un maille de 3745(Cf :Tableau 19). Les résultats de calcul dans SYSWELD en utilisant le chargement pressure est la même.

3.2.3 Comparaison les résultats ABAQUS et SYSWELD

a. Comparaison Thermo-Elastique Électrode

Après effectués la simulation dans ABAQUS et SYSWELD, alors on obtient les résultats de ces simulations, puis nous comparons les résultats de la simulation. Ci-dessous nous vous présentons les résultats de comparaison entre les

valeurs thermo-élastique de ABAQUS que sans frottement et les valeurs thermo-élastique de SYSWELD que sans la variable de frottement ;

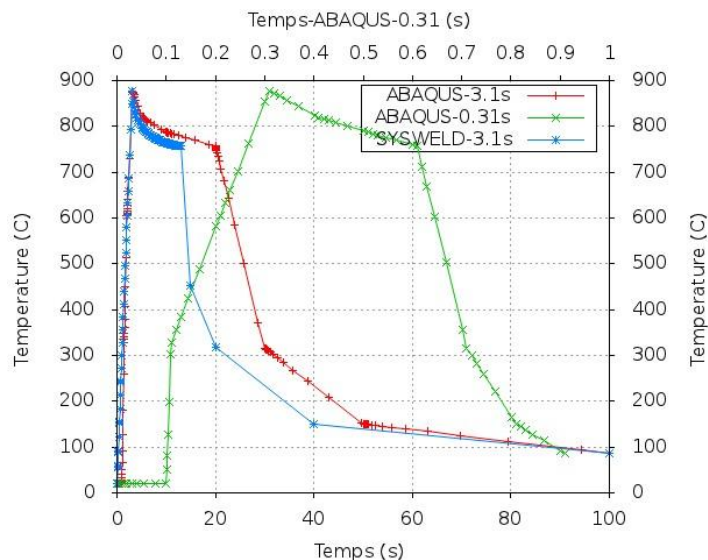


Figure 49. Comparaison les courbes de température dans ABAQUS et SYSWELD

La courbe ci-dessus montre le chargement de la température sur le processus un cycle du soudage quand le processus de soudage au temps 0,31s et 3,1s, on a choisi un nœud 352 de maille de tôle (280), le température 878,1 °C.

Tableau 20. Comparaison les résultats de calcul sans frottement dans SYSWELD et ABAQUS

Logiciel	Partie	N° Maille	Temps (s)	Contrainte 22 (MPa)	Déformation 22
ABAQUS	Electrode	280	3,1	-240,1	-2,6619e-03
SYSWELD	Electrode	280	3,1	-77,8138	7,22368E-06
ABAQUS	Tôle	3745	3,1	-228,7	-1,3440e-03
SYSWELD	Tôle	3745	3,1	-71,5543	-6,82833E-05

Les résultats de la comparaison que nous obtenons, nous pouvons observer dans le tableau ci-dessus, les résultats d'ABAQUS et SYSWELD que ont pas la même valeur, la valeur de contrainte et la valeur de déformation d'électrode dans SYSWELD est plus grande que la valeur d'ABAQUS, et la valeur de contrainte de tôle dans ABAQUS est plus petite que la valeur de SYSWELD et la valeur de

déformation d'ABAQUS est plus grande que la valeur de SYSWELD (Cf. Tableau 20).

3.3 Conclusion

La modélisation est effectuée pour calculer la valeur de Elastique et thermo Elastique, en utilisant deux logiciel: SYSWELD et ABAQUS. Nous avons fait des comparaisons les résultats de calcul élastique et thermo-élastique des deux logiciels, les résultats de calcul élastique ne sont pas beaucoup différents et les valeurs de calcul thermo-élastique des deux logiciels sont différentes.

CHAPITRE IV

Conclusion

Ce stage était intéressant et difficile, il nous a permis de comprendre comment à partir d'un essai expérimental utilise la machine Gleeble, et compris le modèle elasto-visco plastique, et un calcul d'éléments finis notre modèle ajouter une variable de vieillissement par le logiciel SiDoLo. Lors de ce stage nous avons pu fournir un travail d'avancement pour caractériser le CuCr1Zr et Modélisation contact électrode et tôle pour calculer la valeur d'élastique et thermo-élastique d'une simulation le processus un cycle du soudage en utilisant ABAQUS et SYSWELD, nous pouvons trouver la comparaison de deux Logiciels; ABAQUS et SYSWELD mais il reste encore du travail. Nous en avons conclu que nous ne pouvons pas déterminer sur ce matériau et que pour intégrer ce modèle à Abaqus il faudra analyses expérimental et numérique d'un essai cyclique sur électrode.

Nous espérons avoir pu être d'une aide dans l'avancement du travail d'Elise GAUTHIER la doctorante.

Bibliographie

- [1] G. Sibilia, *Modélisation du soudage par point - Influence des conditions interfaciales sur le procédé*, Thèse de Doctorat, Polytechnique Nantes, 2003.
- [2] R. Raelison, *Etude et modélisation des conditions interfaciales dans le procédé de soudage par points de tôles revêtues*, Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Sud, 2010.
- [3] J.CLAEYS, T.DUPUY, P.VERRIER, *Technique de l'ingénieur (soudage des tôles revêtues)*, BM 7 771[1-14], 2005.
- [4] J.Wisniewski, *Modélisation thermomécanique de la fissuration à chaud en soudage par faisceau d'électrons d'un alliage CuCrZr*, Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Sud, 2009.
- [5] T.B. Massalski, J.L. Murray, L.H. Bennett, H. Baker. *Binary Alloy Phase Diagrams – American Society for Metals, Vol. 1, 1986.*
- [6] Elseiver, *Influence of the manufacturing heat cycles on the CuCrZr properties, Journal of Nuclear Materials* 307–311 (2002) 677–680.
- [7] G. Cailletaud, M. Tijani, *Polycopy Mécanique Des Matériaux Solides, MINES Paris Tech, 2011. <http://mms2.ensmp.fr/>.*
- [8] J.Lemaitre, J.Louis Chaboche, A.Benallal, R.Desmorat, *Mécanique des matériaux solides, Cours - Masters, écoles d'ingénieurs, Dunod, 2008.*
- [9] B BARLAS, *Etude du comportement et de l'endommagement en fatigue d'alliages d'aluminium de fonderie*. Thèse de doctorat, ENS Mines de Paris 2004.
- [10] P. Pilvin. *Notice d'utilisation de SiDoLo. Laboratoire Génie Mécanique et Matériaux Université de Bretagne-Sud. Version 2.4495. 2003*
- [11] Documentation ABAQUS version 6.8, www.simulia.com.
- [12] *Techniques de l'ingénieur [Cuivres alliés], V2 p11-p24, 2004.*

Annexes 1

1. Préparation nos éprouvettes

Tableau a. L'éprouvette de lbitm-06 CuCr1Zr

Longueur Epreuve (Lo)	130 mm	Distance TC1-TC2	4.5 mm
Distance non filète (L3)	65 mm	Distance TC1-TC3	4.5 mm
Longueur non Filète (L2)	98.88 mm	Diamètre initial (Do)	10.03 mm

Tableau b. L'éprouvette de lbitm-07 CuCr1Zr

Longueur Epreuve (Lo)	129.6 mm	Distance TC1-TC2	4.5 mm
Distance non filète (L3)	64.8 mm	Distance TC1-TC3	4.5 mm
Longueur non Filète (L2)	98.5 mm	Diamètre initial (Do)	10.11 mm

Tableau c. L'éprouvette de lbitm-08 CuCr1Zr

Longueur Epreuve (Lo)	130.7 mm	Distance TC1-TC2	4.5 mm
Distance non filète (L3)	65.35 mm	Distance TC1-TC3	4.5 mm
Longueur non Filète (L2)	99 mm	Diamètre initial (Do)	9.95 mm

2. Préparation nos éprouvettes

Tableau a. les valeurs de dilatomètre

Epreuve	TC1 (°C)	Dilatometre (20 °C)	Dilatometre (TC1 °C)	Diametre D0 (mm)	Diametre D1 (mm)
Lbitm-01a	750	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$620 \cdot 10^{-3}$	9,95	10,566
Lbitm-02a	650	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$117 \cdot 10^{-3}$	9,97	10,0836
Lbitm-02b	650	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$-148,5 \cdot 10^{-3}$	9,97	9,8181
Lbitm-03a	600	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$175 \cdot 10^{-3}$	9,98	10,1516
Lbitm-03b	750	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$85 \cdot 10^{-3}$	9,98	10,0616
Lbitm-04a	500	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$86 \cdot 10^{-3}$	10,03	10,1126
Lbitm-05a	500	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$85 \cdot 10^{-3}$	9,99	10,0716
Lbitm-05b	800	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$-155 \cdot 10^{-3}$	9,99	9,8316
Lbitm-06a	700	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$127 \cdot 10^{-3}$	10,03	10,1536
Lbitm-06b	700	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$50 \cdot 10^{-3}$	10,03	10,0766
Lbitm-07a	700	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$126,5 \cdot 10^{-3}$	10,11	10,2331
Lbitm-07b	775	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$-140 \cdot 10^{-3}$	10,11	9,97

3. Formule calcul de contrainte et déformation

$$\sigma = \frac{F}{Section}$$

F = Force (N)

$$Section = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2$$

$$Section = \pi \left(\frac{\delta_m + D_0 - \delta_{20^\circ C} + \delta_T}{2} \right)^2$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{D}{D_1}\right)$$

$$D = \delta_m - \alpha + D_0$$

$$D_1 = D_0 - \delta_{20^\circ C} + \delta_T$$

δ_m = Dilatation mesure (μm)

$\delta_{20^\circ C}$ = Dilatation quand 20°C (μm) (pour CuCr1Zr = $3,4 \cdot 10^{-3}$ mm)

δ_T = Dilatation quand température ($T^\circ\text{C}$)

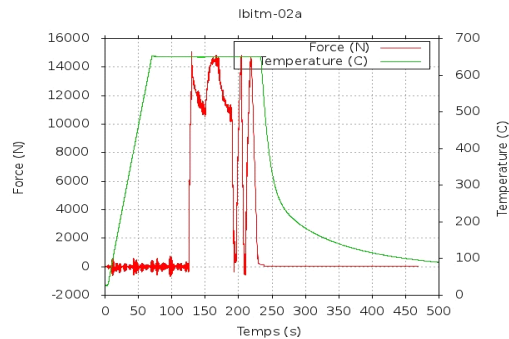
D_0 = Diamètre initial (mm)

α = Coefficient ecrouissage (pour CuCr1Zr = $0,2 \cdot 10^{-3}$ mm)

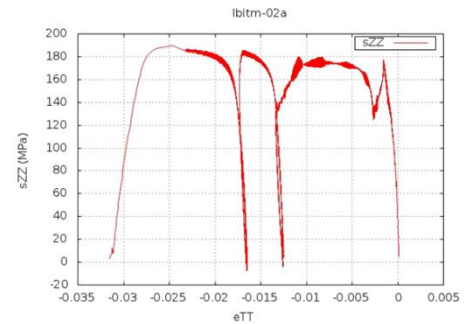
Annexes 2

2. Les résultats de Gleeble et les résultats de calcul de nos éprouvettes

3.1 Eprouvette lbitm-02a

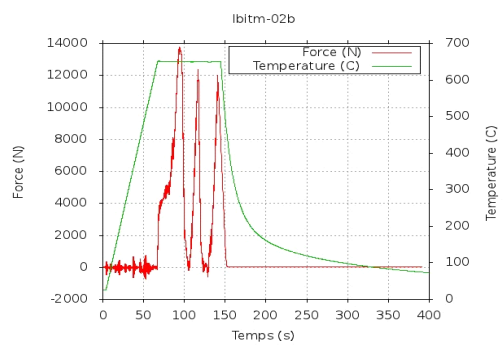


a. Force et Temperature en fonction du temps

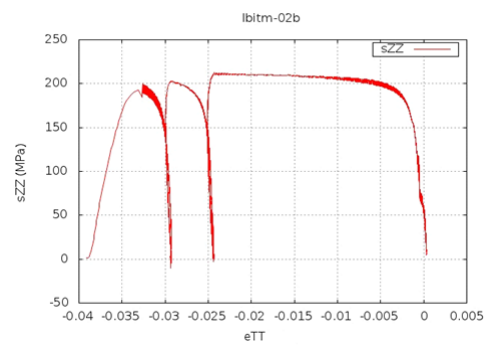


b. Contrainte ZZ en fonction d'epsilon

3.2 Eprouvette lbitm-02b

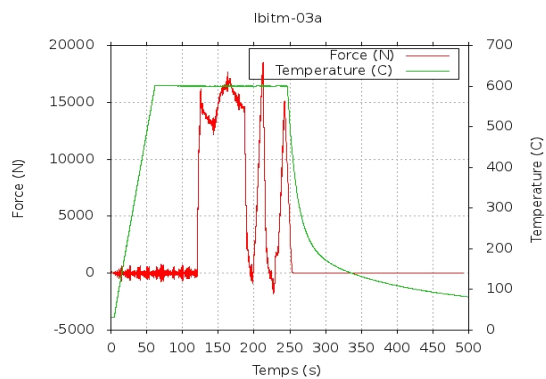


a. Force et Temperature en fonction du temps

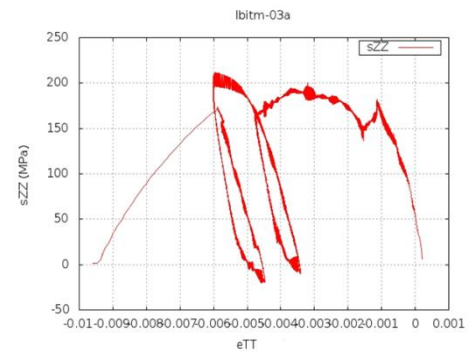


b. Contrainte ZZ en fonction d'epsilon

3.3 Eprouvette lbitm-02c

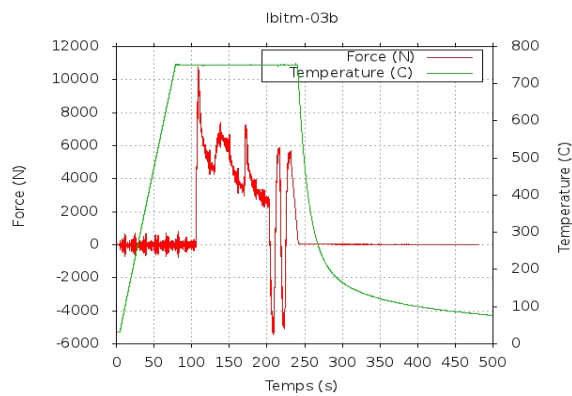


a. Force et Temperature en fonction du temps

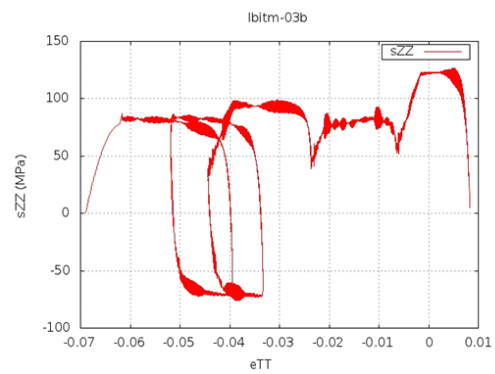


b. Contrainte ZZ en fonction d'epsilon

3.4 Epruvette Ibitm-03a

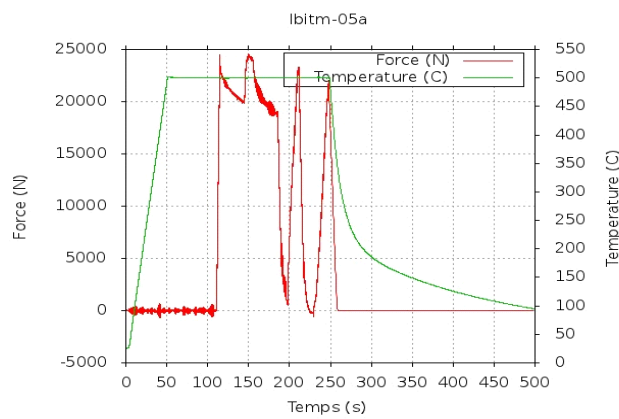


a. Force et Temperature en fonction du temps

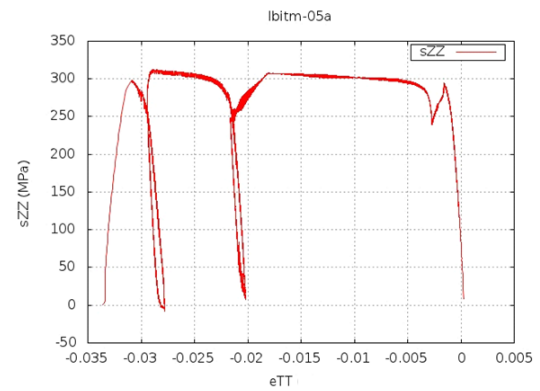


b. Contrainte ZZ en fonction d'epsilon

3.5 Epruvette Ibitm-05a

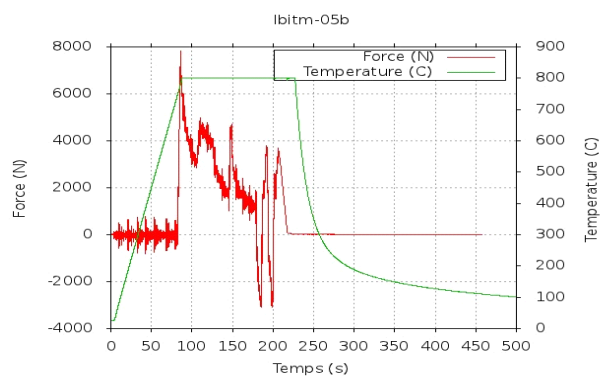


a. Force et Temperature en fonction du temps

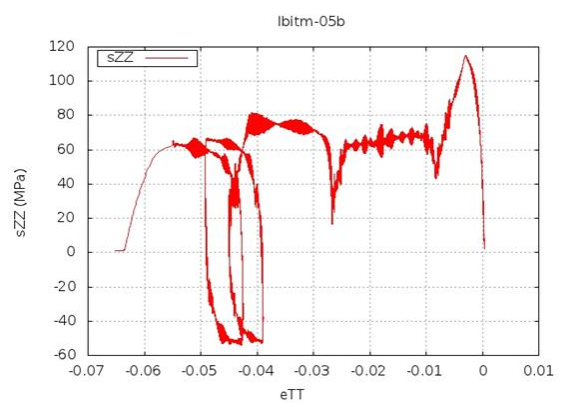


b. Contrainte ZZ en fonction d'epsilon

3.6 Epruvette Ibitm-05b

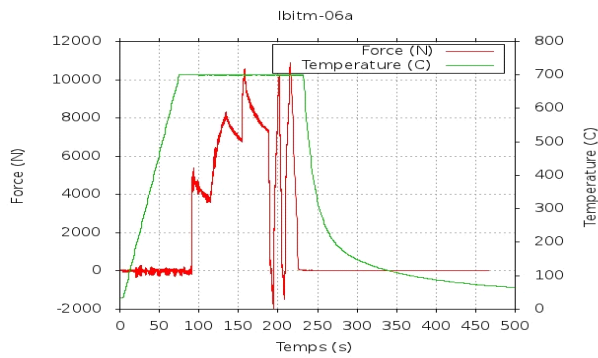


a. Force et Temperature en fonction du temps

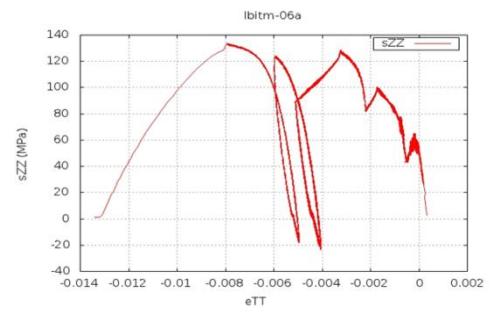


b. Contrainte ZZ en fonction d'epsilon

3.7 Epruvette Ibitm-06a

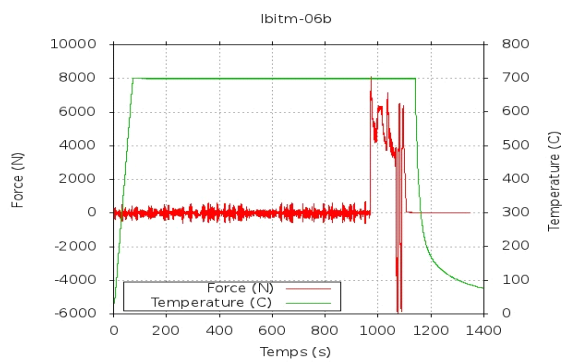


a. Force et Temperature en fonction du temps

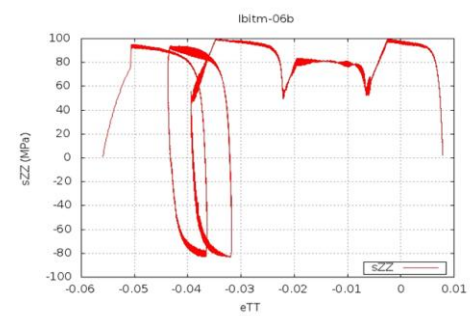


b. Contrainte ZZ en fonction d'epsilon

3.8 Epruvette Ibitm-06b

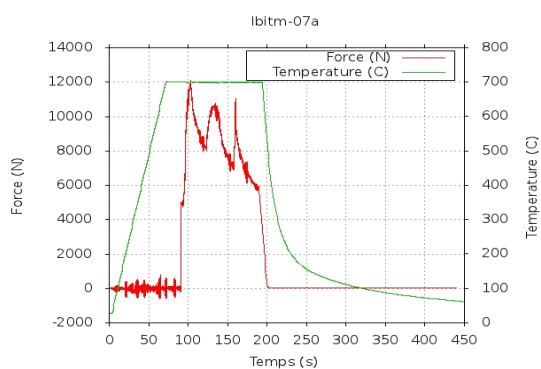


a. Force et Temperature en fonction du temps

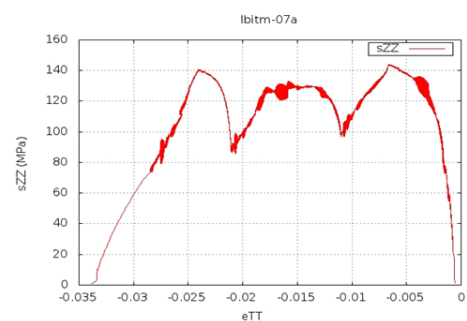


b. Contrainte ZZ en fonction d'epsilon

3.9 Epruvette Ibitm-07a

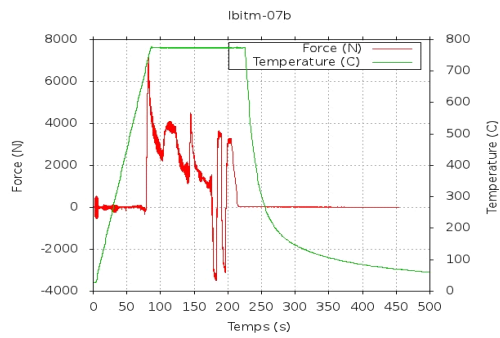


a. Force et Temperature en fonction du temps

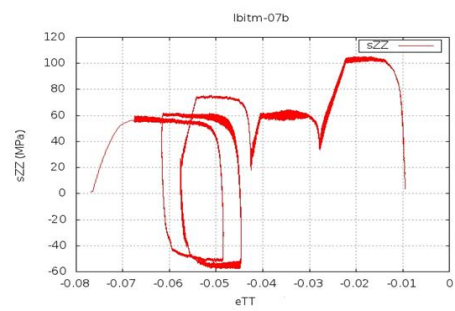


b. Contrainte ZZ en fonction d'epsilon

3.10 Eprouvette lbitm-07b



a. Force et Temperature en fonction du temps

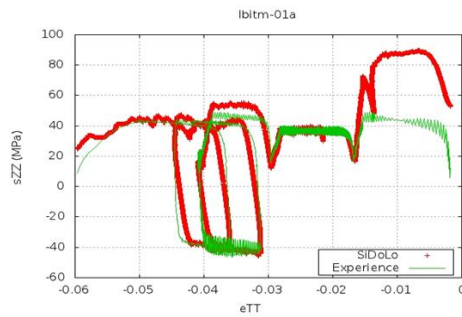


b. Contrainte ZZ en fonction d'epsilon

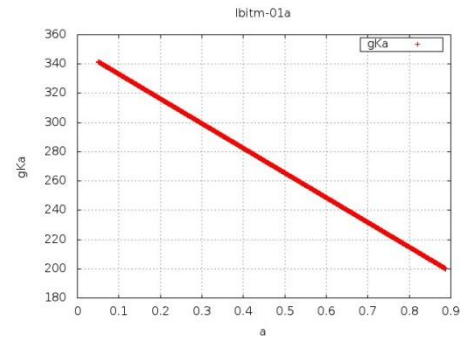
Annexes 3

1. Les résultats d'identification SiDoLo

a. Résultat d'identification par SiDoLo lbitm-01a

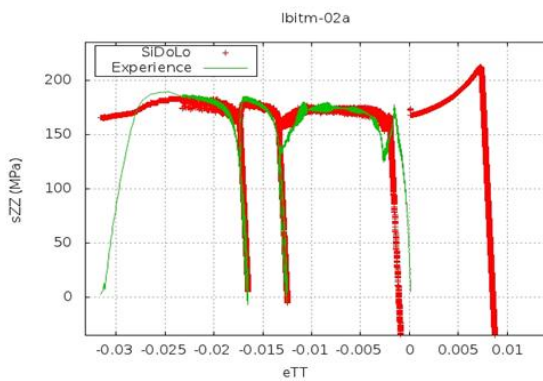


a. Contrainte en fonction de deformation

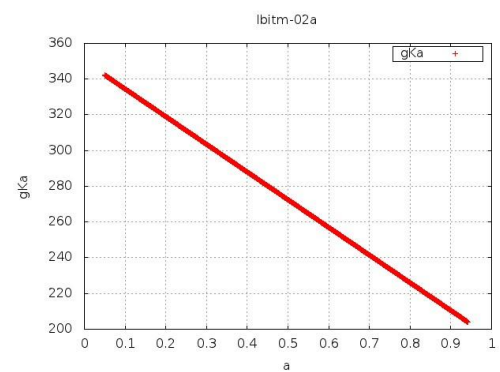


b. La valeur de K (a)

b. Résultat d'identification par SiDoLo lbitm-02a

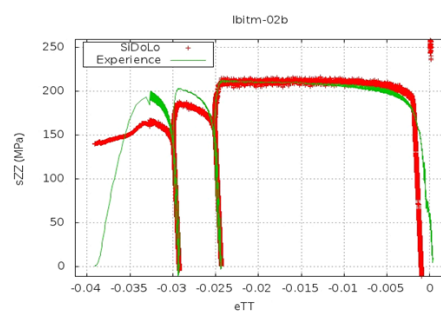


a. Contrainte en fonction de deformation

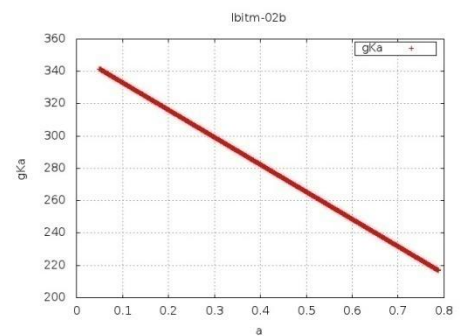


b. La valeur de K (a)

c. Résultat d'identification par SiDoLo lbitm-02b

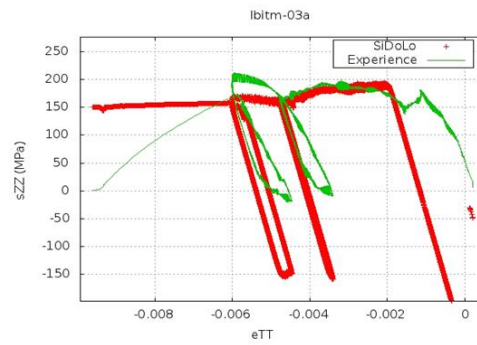


a. Contrainte en fonction de deformation

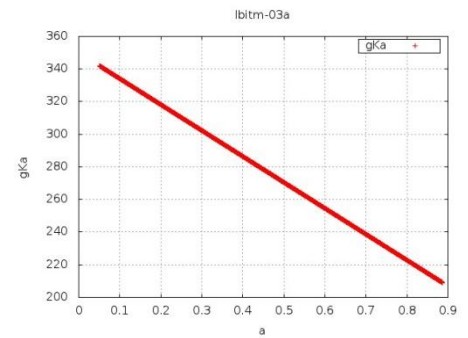


b. La valeur de K (a)

d. Résultat d'identification par SiDoLo lbitm-03a

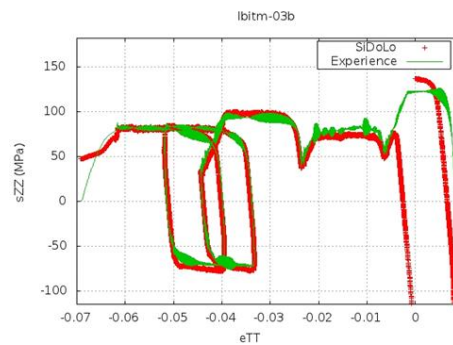


a. Contrainte en fonction de deformation

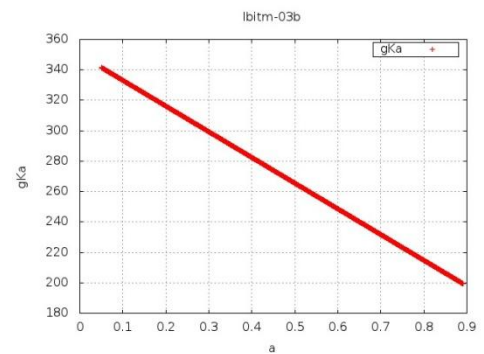


b. La valeur de K (a)

e. Résultat d'identification par SiDoLo lbitm-03b

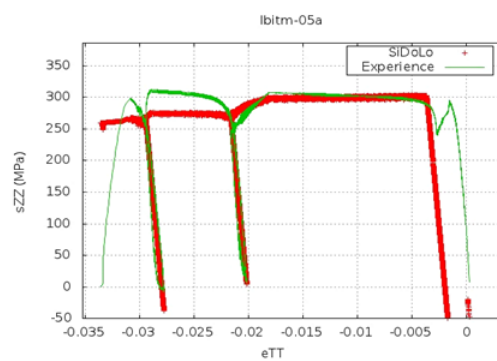


a. Contrainte en fonction de deformation

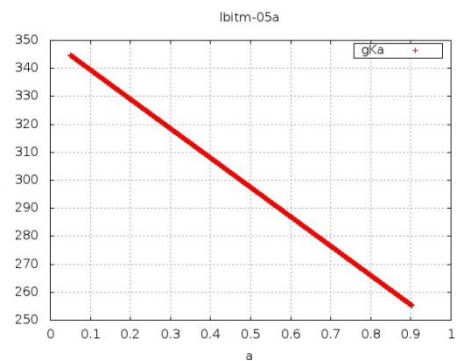


b. La valeur de K (a)

f. Résultat d'identification par SiDoLo lbitm-05a

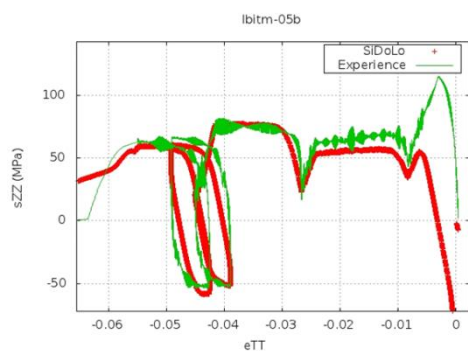


a. Contrainte en fonction de deformation

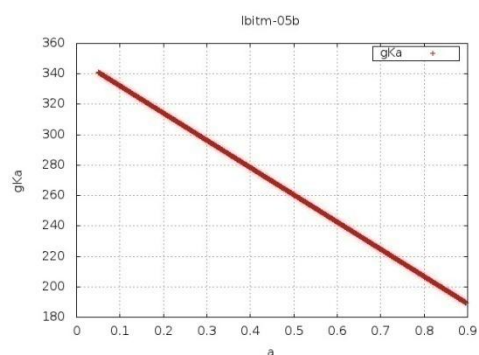


b. La valeur de K (a)

g. Résultat d'identification par SiDoLo lbitm-05b

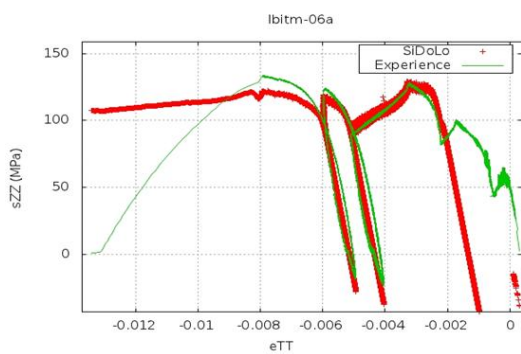


a. Contrainte en fonction de deformation

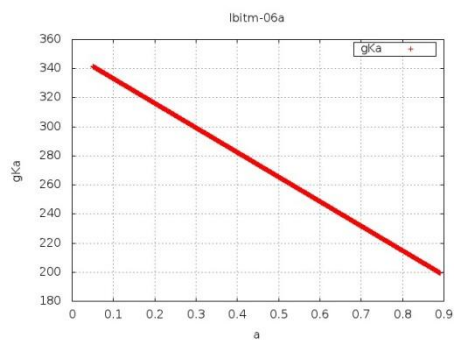


b. La valeur de K (a)

h. Résultat d'identification par SiDoLo lbitm-06a

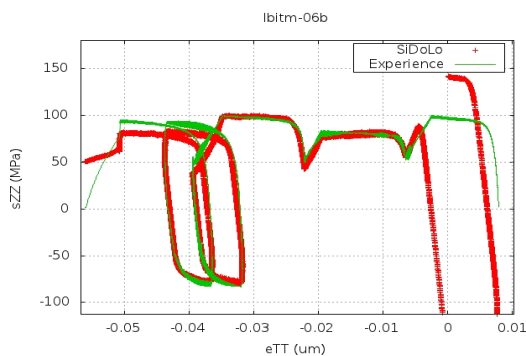


a. Contrainte en fonction de deformation

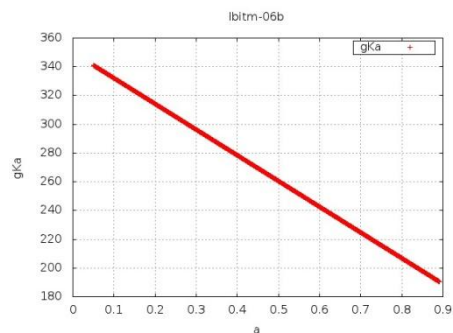


b. La valeur de K (a)

i. Résultat d'identification par SiDoLo lbitm-06b

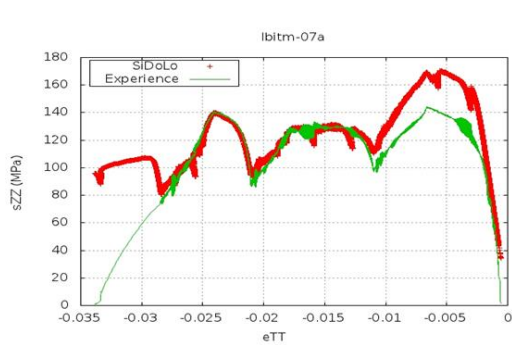


a. Contrainte en fonction de deformation

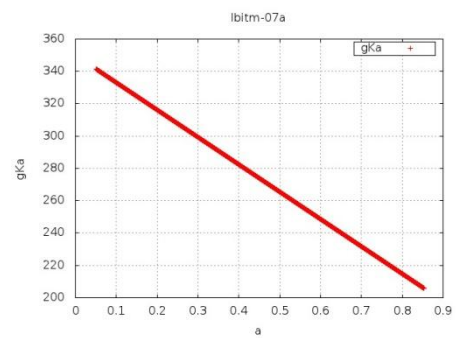


b. La valeur de K (a)

j. Résultat d'identification par SiDoLo lbitm-07a

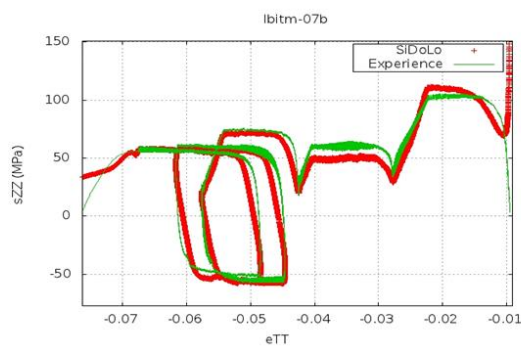


a. Contrainte en fonction de deformation

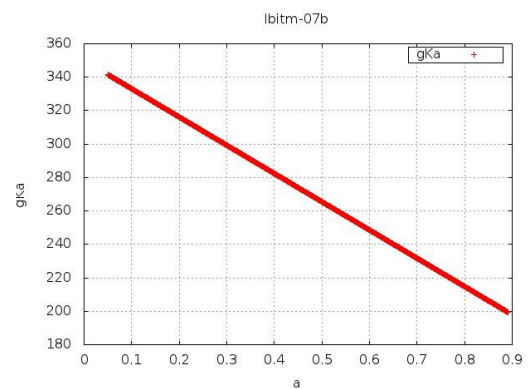


b. La valeur de K (a)

k. Résultat d'identification par SiDoLo lbitm-07b

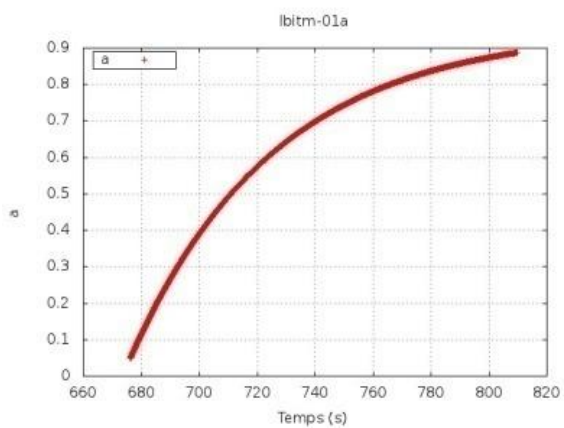


a. Contrainte en fonction de deformation

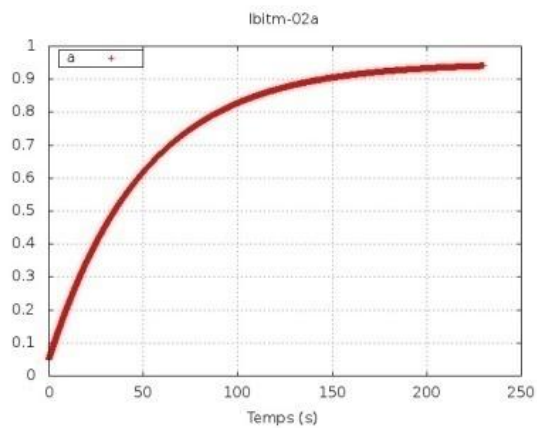


b. La valeur de K (a)

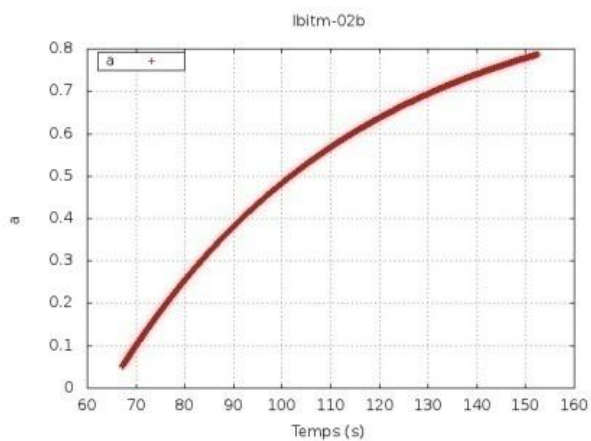
L. Le Variable de Vieillessement



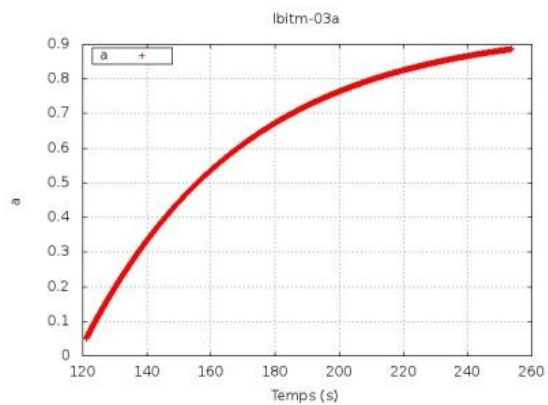
(a)



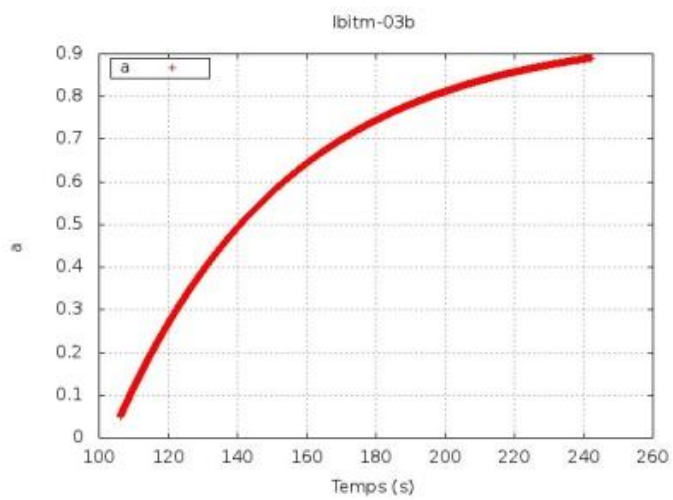
(b)



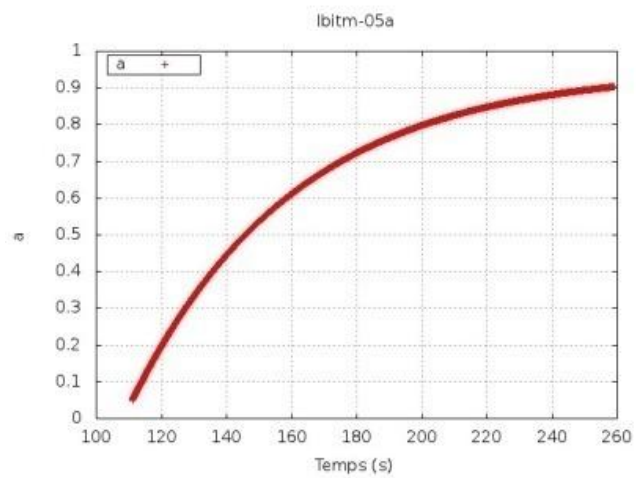
(c)



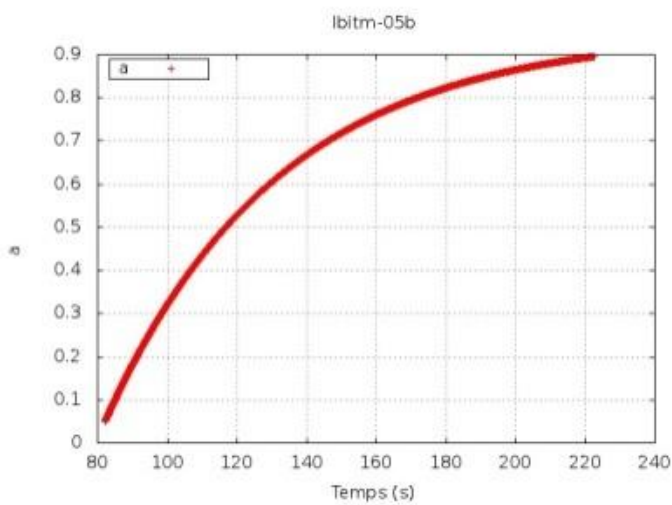
(d)



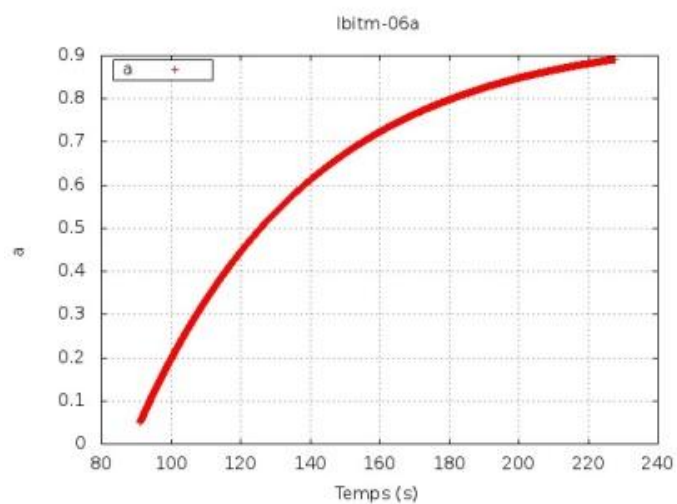
(e)



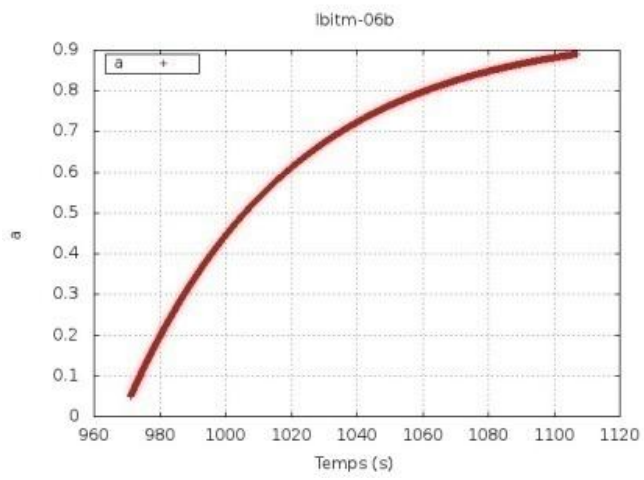
(f)



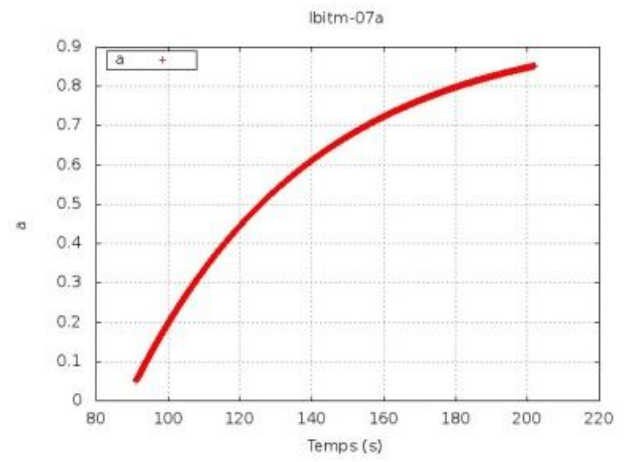
(g)



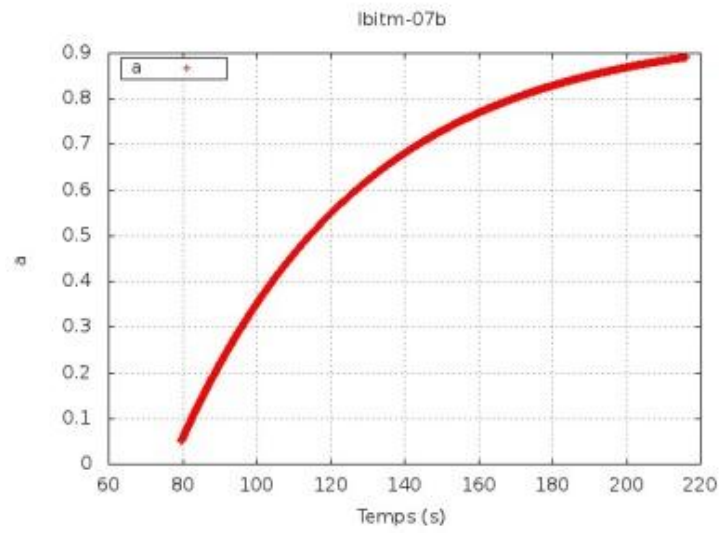
(h)



(i)



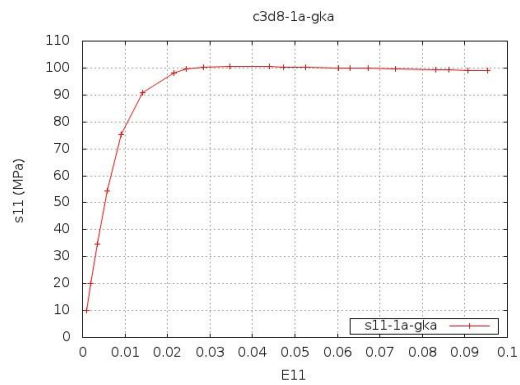
(j)



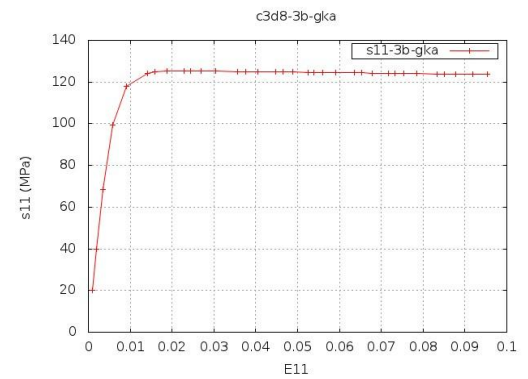
(h)

Annexes 4

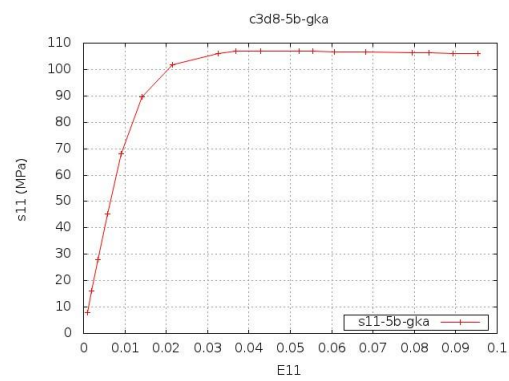
1. Vérification un élément CAX4 utiliser la valeur de gKa



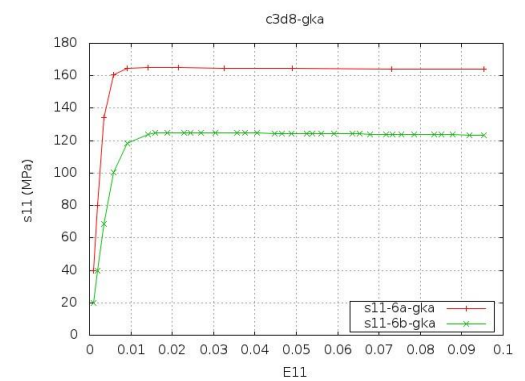
(a)



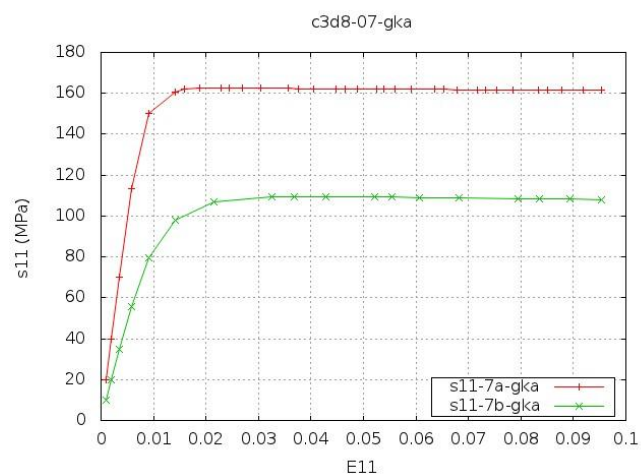
(b)



(c)

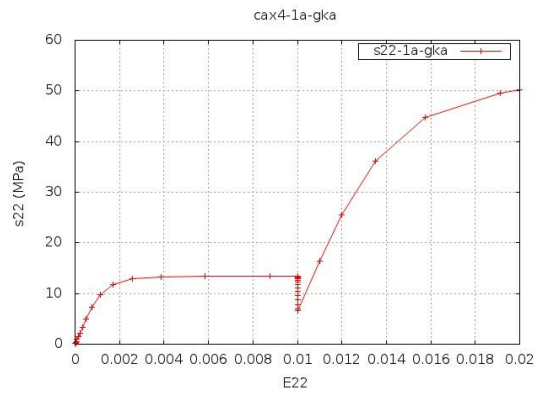


(d)

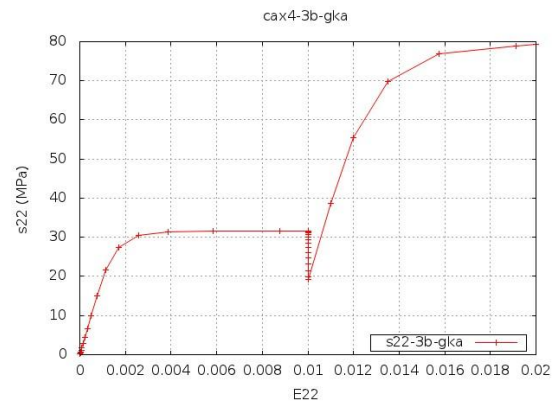


(e)

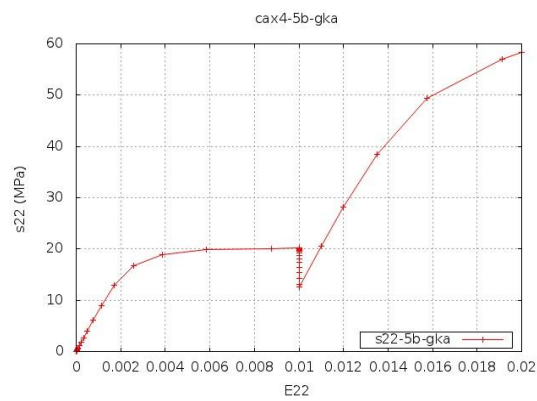
2. Vérification un élément CAX4 utiliser la valeur de gKa



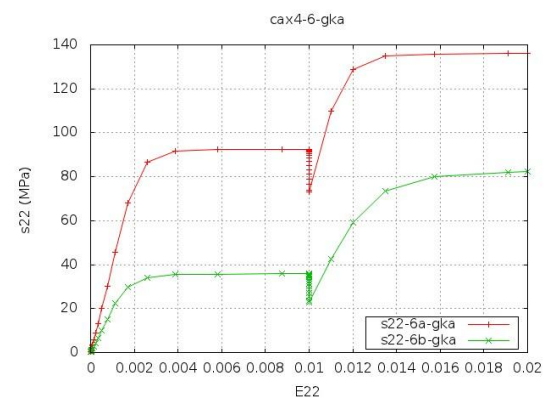
(a)



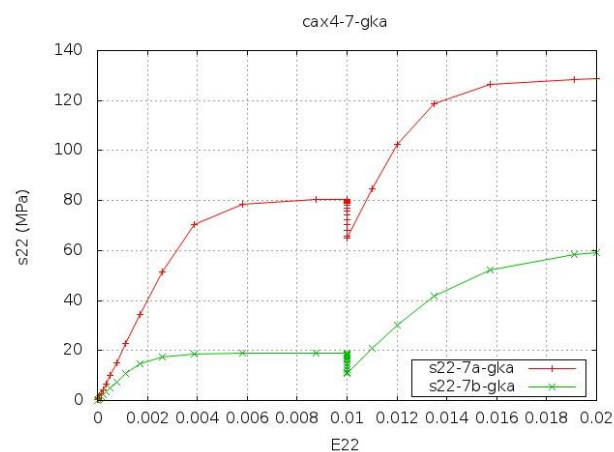
(b)



(c)

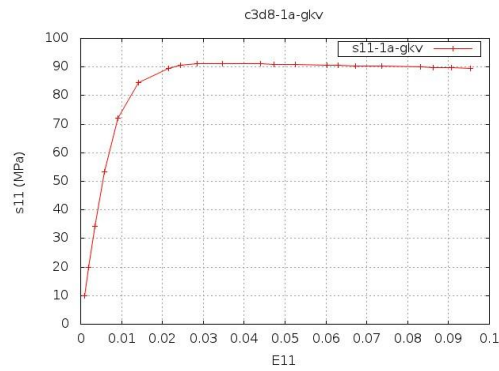


(d)

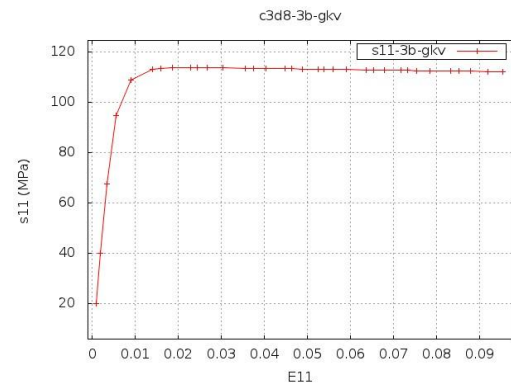


(e)

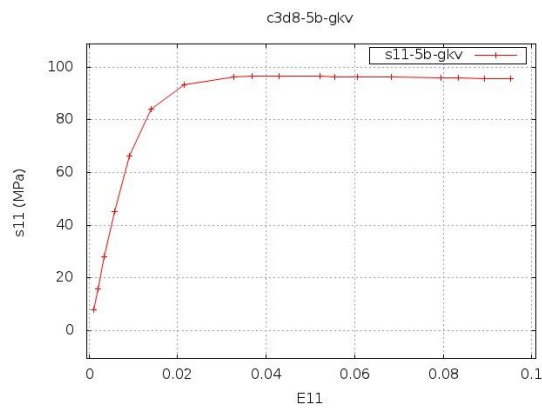
3. Vérification un élément C3D8 utiliser la valeur de gKv



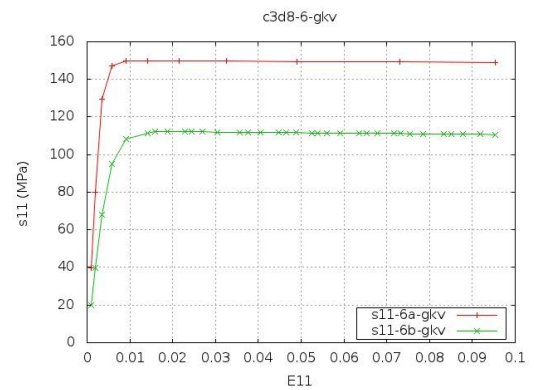
(a)



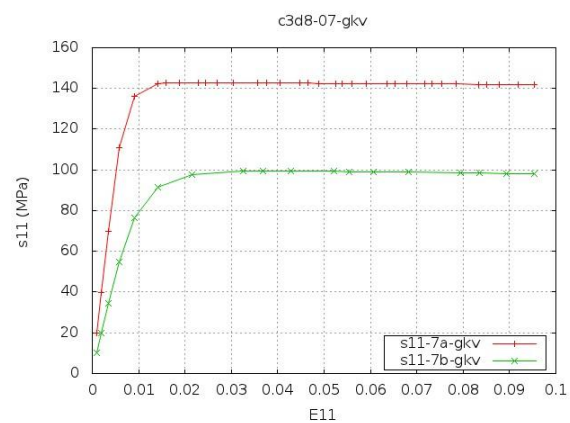
(b)



(c)

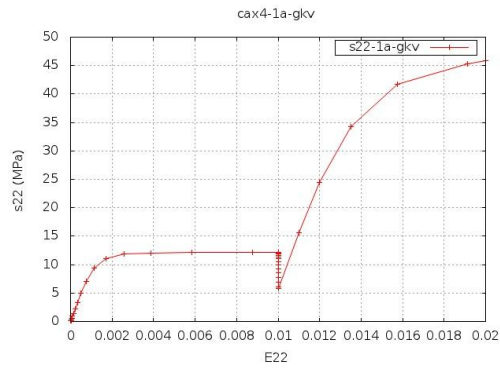


(d)

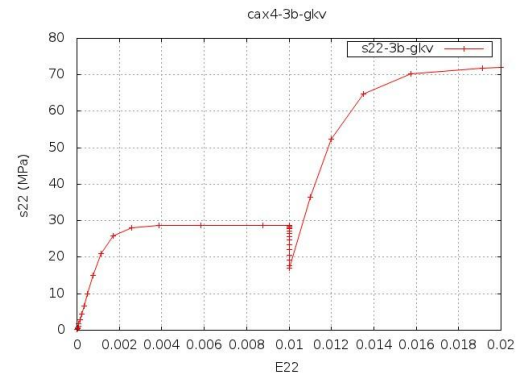


(e)

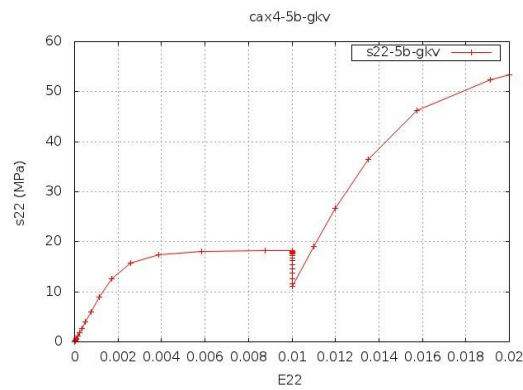
4. Vérification un élément CAX4 utiliser la valeur de gKv



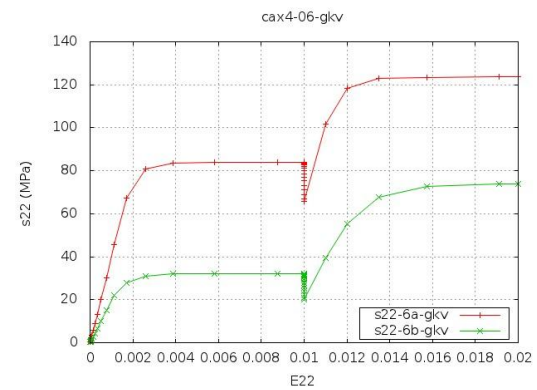
(a)



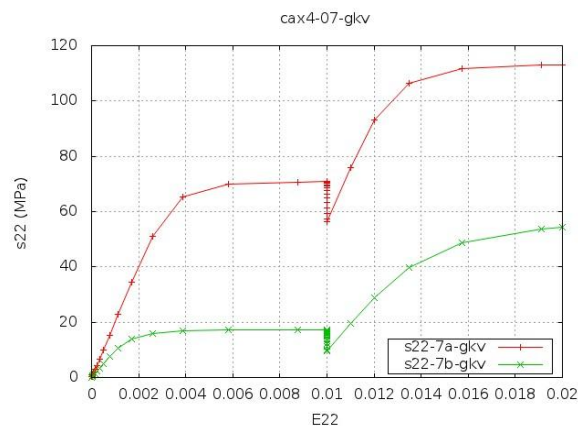
(b)



(c)



(d)



(e)

Annexes 5

La Syntac Identification dans le logiciel SiDoLo

```

SUBROUTINE grandf(vdk,dv,vv)
  IMPLICIT REAL*8 (a-h,o-z)
  INCLUDE 'sidvar.h'
  REAL*8 dv(*),vv(*)
  CHARACTER*8 vdk(*)
com=====
com Sous-programme utilisateur pour ecriture du modele differentiel
com vdk contient le nom des variables controlees
com dv contient les derivees de ces variables a l instant t
com vv contient les valeurs de ces variables a l instant t
com=====
  IF (vdk(1)(1:3).EQ.'eTT') THEN
    eTT=vv(1)
    sZZ=-Ym*(eTT+0.5*evpZZ)/xnu
  ELSE IF (vdk(1)(1:3).EQ.'eZZ') THEN
    eZZ=vv(1)
    sZZ=Ym*(eZZ-evpZZ)
  ELSE
    WRITE(6,*)'SToP pb au chargement'
    STOP
  END IF
  FdeC=ABS(sZZ)-sigY
  pa=ag+a_zero
  gKa=gKV+(gK0-gKV)*(1.-pa)
  IF (FdeC.GT.0.) THEN
    depcum=(FdeC/gKa)**pn
    devpZZ=depcum*sZZ/ABS(sZZ)
  ELSE
    devpZZ=0.
  END IF
  dag=(a_infini-pa)/tau
  END
c
SUBROUTINE grandg(ifsim)
  IMPLICIT REAL*8 (a-h,o-z)
  INCLUDE 'sidvar.h'
com=====
  eZZ=sZZ/Ym+evpZZ
  eTT=-xnu*sZZ/Ym-evpZZ/2.
  END
c
SUBROUTINE lecuser
  ENTRY petitg
  ENTRY grandh
  END

```

Annexes 6

1. Program Elastique dans ABAQUS

➤ Force

```

*NODE,INPUT=rjja.nod,NSET=all_nodes
*ELEMENT,TYPE=CAX3,INPUT=rjja.el3,ELSET=all_el3s
*ELEMENT,TYPE=CAX4,INPUT=rjja.el4,ELSET=all_el4s
*ELSET,ELSET=all_elts
all_el3s,all_el4s
*ELSET,ELSET=e_tole,GENERATE
1,2516
*ELSET,ELSET=electrodes,GENERATE
2517,5100
**
*SOLID SECTION,ELSET=electrodes,MATERIAL=mat_cu
*MATERIAL,NAME=mat_cu
*ELASTIC
89000.,0.33
*SOLID SECTION,ELSET=e_tole,MATERIAL=dp600
*MATERIAL,NAME=dp600
*ELASTIC
200000.,0.3
**
*ELSET,ELSET=inf_tole_bas,GENERATE
1,851,10
*SURFACE,NAME=sinf_tole_bas,TYPE=ELEMENT
inf_tole_bas,S1
**..
*ELSET,ELSET=sup_tole_haut,GENERATE
1268,2118,10
*SURFACE,NAME=ssup_tole_haut,TYPE=ELEMENT
sup_tole_haut,S3
**..
*ELSET,ELSET=electrode_haut4,GENERATE
2517,2576
*SURFACE,NAME=selectrode_haut,TYPE=ELEMENT
electrode_haut4,S4
**..
*ELSET,ELSET=electrode_bas4,GENERATE
3540,3599
*SURFACE,NAME=selectrode_bas,TYPE=ELEMENT
electrode_bas4,S4
**
*CONTACT PAIR, INTERACTION=frott_haut
selectrode_haut,ssup_tole_haut
*SURFACE INTERACTION, NAME=frott_haut
*FRICTION
0.0
**..
*CONTACT PAIR, INTERACTION=frott_bas
selectrode_bas,sinf_tole_bas
*SURFACE INTERACTION, NAME=frott_bas
*FRICTION
0.0
**
*NSET,NSET=axeZ
3803,2848,1434,1424,10,1,3929,4901
*NSET,NSET=zEQ1
2900, 2959, 2960, 2901
1532, 1543, 1544, 1533
*ELSET,ELSET=z_cu
2567, 1358
*NSET,NSET=bot,GENERATE
4956,4960,1
*NSET,NSET=top,GENERATE
3895,3928,11
*EQUATION
2
top,2,+1.,3884,2,-1
**

```

```

*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
0.01,1.
*BOUNDARY
bot,2
3884,2,2,-0.03
*NODE PRINT,NSET=zEQ1
U
*NODE PRINT,NSET=bot,TOTAL=YES
RF
*EL PRINT,ELSET=z_cu,POS=CENTROID,SUM=NO
S,E
*END STEP
**
*STEP,AMPLITUDE=RAMP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
0.01,.1
*BOUNDARY,OP=NEW
bot,2
*CLOAD
3884,2,-2100.
*NODE PRINT,NSET=zEQ1
U
*NODE PRINT,NSET=bot,TOTAL=YES
RF
*EL PRINT,ELSET=z_cu,POS=CENTROID,SUM=NO
S,E
*END STEP

```

➤ **Pressure**

```

*NODE,INPUT=rjja.nod,NSET=all_nodes
*ELEMENT,TYPE=CAX3,INPUT=rjja.el3,ELSET=all_el3s
*ELEMENT,TYPE=CAX4,INPUT=rjja.el4,ELSET=all_el4s
*ELSET,ELSET=all_elts
all_el3s,all_el4s
*ELSET,ELSET=e_tole,GENERATE
1,2516
*ELSET,ELSET=electrodes,GENERATE
2517,5100
**
*SOLID SECTION,ELSET=electrodes,MATERIAL=mat_cu
*MATERIAL,NAME=mat_cu
*ELASTIC
89000.,0.33
*SOLID SECTION,ELSET=e_tole,MATERIAL=dp600
*MATERIAL,NAME=dp600
*ELASTIC
200000.,0.3
**
*ELSET,ELSET=inf_tole_bas,GENERATE
1,851,10
*SURFACE,NAME=sinf_tole_bas,TYPE=ELEMENT
inf_tole_bas,S1
**_
*ELSET,ELSET=sup_tole_haut,GENERATE
1268,2118,10
*SURFACE,NAME=ssup_tole_haut,TYPE=ELEMENT
sup_tole_haut,S3
**_
*ELSET,ELSET=electrode_haut4,GENERATE
2517,2576
*SURFACE,NAME=selectrode_haut,TYPE=ELEMENT
electrode_haut4,S4
**_
*ELSET,ELSET=electrode_bas4,GENERATE
3540,3599
*SURFACE,NAME=selectrode_bas,TYPE=ELEMENT
electrode_bas4,S4
**
*CONTACT PAIR, INTERACTION=frott_haut

```

```

selectrode_haut,ssup_tole_haut
*SURFACE INTERACTION, NAME=frott_haut
*FRICTION
0.0
**_
*CONTACT PAIR, INTERACTION=frott_bas
selectrode_bas,sinf_tole_bas
*SURFACE INTERACTION, NAME=frott_bas
*FRICTION
0.0
**
*_____
*NSET,NSET=axeZ
3803,2848,1434,1424,10,1,3929,4901
*NSET,NSET=zEQ1
2900, 2959, 2960, 2901
1532, 1543, 1544, 1533
*ELSET,ELSET=z_cu
2567, 1358
*NSET,NSET=bot,GENERATE
4956,4960,1
**
*_____
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
0.01,1.
*BOUNDARY
bot,2
3884,2,2,-0.05
*NODE PRINT,NSET=zEQ1
U
*NODE PRINT,NSET=bot,TOTAL=YES
RF
*EL PRINT,ELSET=z_cu,POS=CENTROID,SUM=NO
S,E
*END STEP
**
*_____
*STEP,AMPLITUDE=RAMP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
0.01,.1
*BOUNDARY,OP=NEW
bot,2
*DLOAD
3509,P3,23.873
3519,P3,23.873
3529,P3,23.873
3539,P3,23.873
*NODE PRINT,NSET=zEQ1
U
*NODE PRINT,NSET=bot,TOTAL=YES
RF
*EL PRINT,ELSET=z_cu,POS=CENTROID,SUM=NO
S,E
*END STEP

```

2. Program Elastique SYSWELD

```

;-----;;
;-----;;
;   Calcul ETM
;-----;;
;-----;;

RECH DONN 622 ASCII
RECLASS ITER 10
RETOU

MODE BATCH
;déclaration des groupes de noeuds et mailles
$GROUPE CREE NOM CETSUP_E
MAILLE GROUPE $C1$ $C2$
RETOU
$GROUPE CREE NOM CETSUP_T
MAILLE GROUPE $L17$ $L16$
RETOU

$GROUPE CREE NOM CTT_TSUP
MAILLE GROUPE $L11$
MAILLE GROUPE $L12$
MAILLE GROUPE $L13$
RETOU
$GROUPE CREE NOM CTT_TINF
MAILLE GROUPE $L5$
MAILLE GROUPE $L6$
MAILLE GROUPE $L7$
RETOU

$GROUPE CREE NOM CETINF_T
MAILLE GROUPE $L1$ $L2$
RETOU
$GROUPE CREE NOM CETINF_E
MAILLE GROUPE $C3$ $C4$
RETOU

DEFINI
ASSEMBLAGE 1 TOLE DP6G EPAISSEUR 1mm
OPTION THERMI ELECTROCINE METALLURGIE AXISYME
REPETER GEOME
CARACTERISTIQUES

MAILLE / INTEG 2

;Proprietes Thermique-Metallurgique-Electrique de la TOLE en DP6G
MAILLE GROUPE $D1$ $D2$ $D3$/ SIGX SIGY -15 MATER 1 INTEG 2
MAILLE GROUPE $D4$ $D5$ $D6$/ SIGX SIGY -15 MATER 1 INTEG 2

;Proprietes Thermique-electriques de l'ELECTRODE en cuivre
MAILLE GROUPE $D7$ $D8$/KX KY -20 RHO -25 C -26 SIGX SIGY -28 INTEG 2
MAILLE GROUPE $D9$ $D10$/KX KY -20 RHO -25 C -26 SIGX SIGY -28 INTEG 2
MAILLE GROUPE $D11$ $D12$/KX KY -20 RHO -25 C -26 SIGX SIGY -28 INTEG 2
MAILLE GROUPE $D13$ $D14$/KX KY -20 RHO -25 C -26 SIGX SIGY -28 INTEG 2
MAILLE GROUPE $D15$ $D16$/KX KY -20 RHO -25 C -26 SIGX SIGY -28 INTEG 2
MAILLE GROUPE $D17$ $D18$/KX KY -20 RHO -25 C -26 SIGX SIGY -28 INTEG 2
MAILLE GROUPE $D19$ $D20$/KX KY -20 RHO -25 C -26 SIGX SIGY -28 INTEG 2
MAILLE GROUPE $D21$ $D22$/KX KY -20 RHO -25 C -26 SIGX SIGY -28 INTEG 2

;Effusivites mailles peau interfaces
MAILLE GROUPE $CETSUP_E$/ KX 1 RHO 1 C 1
MAILLE GROUPE $CETSUP_T$/ KX 1 RHO 1 C 1

MAILLE GROUPE $CTT_TSUP$/ KX 1 RHO 1 C 1
MAILLE GROUPE $CTT_TINF$/ KX 1 RHO 1 C 1

MAILLE GROUPE $CETINF_T$/ KX 1 RHO 1 C 1
MAILLE GROUPE $CETINF_E$/ KX 1 RHO 1 C 1

```

;Proprietes du contact Electro-Thermique
MILIEU
CNTG/ SURA \$CETSUP_E\$ SURB \$CETSUP_T\$ CONSI 0.001 H -1 R -2 GRPE 1
CNTG/ SURA \$CTT_TINF\$ SURB \$CTT_TSUP\$ CONSI 0.1 H R GRPE 1
CNTG/ SURA \$CETINF_E\$ SURB \$CETINF_T\$ CONSI 0.001 H -1 R -2 GRPE 1

;Définition des conditions aux limites et chargements
LIAISONS

;coeff convecto-radiatif ELECTRODE/ambiance
MAILLE GROUPE \$L21\$ \$L22\$ \$L23\$ \$L24\$ / KT 1 vari -50
MAILLE GROUPE \$L41\$ \$L42\$ \$L43\$ \$L44\$ / KT 1 vari -50

;coeff convectif ELECTRODE/eau
MAILLE GROUPE \$L26\$ \$L27\$ \$L28\$ / KT 0.02
MAILLE GROUPE \$L46\$ \$L47\$ \$L48\$ / KT 0.02

;coeff convecto-radiatif TOLE/ambiance
MAILLE GROUPE \$L15\$ / KT 1 vari -80
MAILLE GROUPE \$L14\$ \$L4\$ / KT 1 vari -81
MAILLE GROUPE \$L3\$ / KT 1 vari -82

;potentiel impose en bas ELECTRODE inferieure
NOEUD GROUPE \$L45\$ /vv

CHARGEMENT

1
;coeff convecto-radiatif ELECTRODE/ambiance
MAILLE GROUPE \$L21\$ \$L22\$ \$L23\$ \$L24\$ / TT 20
MAILLE GROUPE \$L41\$ \$L42\$ \$L43\$ \$L44\$ / TT 20

;coeff convectif ELECTRODE/eau
MAILLE GROUPE \$L26\$ \$L27\$ \$L28\$ / TT 20
MAILLE GROUPE \$L46\$ \$L47\$ \$L48\$ / TT 20

;coeff convecto-radiatif TOLE/ambiance
MAILLE GROUPE \$L15\$ / TT 20
MAILLE GROUPE \$L14\$ \$L4\$ / TT 20
MAILLE GROUPE \$L3\$ / TT 20

NOEUD GROUPE \$L45\$ /vv 0

;I=8.3kA ---->JJ=94.34
MAILLE GROUPE \$L25\$ / JJ 94.34 FT 70

TABLE

;Proprietes TOLE (mesures PSA/LGEP - acier DP600)
15/ 1 (20 5036)(86.1 4190.7)(108.2 3944.4)(130.2 3719.7)(196.3 3130.7)--
(218.4 2966.4)(284.5 2526.7)(306.5 2399.7)(394.7 1967.4)(460.8 1702)--
(549 1411.9)(571 1350.2)(637.1 1178.1)(725.3 974.1)(747.3 933.7)--
(813.5 877.1)(835.5 867)(901.6 845.8)(923.7 840.2)(989.8 823.4) --
(1011.8 819.2)(1100 791.8)(1500 692)(1515 688.8)(1535 643.8)(2000 580)--
(2600 516.2)

;Proprietes ELECTRODE CUIVRE : K, Rho, C, Sig
20/ 1 (20 0.321) (69 0.319) (204 0.311)(379 0.302)(419 0.300)
* (700 0.282) (800 0.255) (1000 0.2019)

25/ 1 (0 8900*-9) (200. 8720*-9) (400. 8540*-9) (600. 8360*-9)
* (800 8180*-9) (1000 8000*-9)

26/ 1 (100 392.8) (200 406)(300 417.3)(400 427.2)(500 435)(600 437)
* (700 436)(800 433) (1000 427)

28/ 1 (0 0.65*5) (200 0.36*5) (400 0.24*5)(600 0.18*5) (800 0.13*5)
* (1000 0.12*5)

;Proprietes de l'interface ELECTRODE/TOLE
;RCT(E/T) POUR UNE TOLE REVETUE

```
;Valeurs gilles DP600 (Jean Oct-2004)
;RCT
;50 10.43 150 2.68 250 1.7 450 1
;Coef conv
;50 0.1 150 0.37 250 0.59 450 1
```

```
1/FORTRAN
FUNCTION F(W)
DIMENSION W(4)
T2=W(1)
F=0
IF(T2.GT.1535) GO TO 60
IF(T2.GT.450) GO TO 50
IF(T2.GT.350) GO TO 40
IF(T2.GT.200) GO TO 30
IF(T2.GT.150) GO TO 20
IF(T2.GT.20) GO TO 10
A0=0
A0=-A0
B0=4.5
RCT=A0*T2
RCT=RCT+B0
GO TO 100
10 A1=1.083*-2
A1=-A1
B1=4.825
RCT=A1*T2
RCT=RCT+B1
GO TO 100
20 A2=0
A2=-A2
B2=3.2
RCT=A2*T2
RCT=RCT+B2
GO TO 100
30 A3=4*-3
A3=-A3
B3=4
RCT=A3*T2
RCT=RCT+B3
GO TO 100
40 A4=2*-3
A4=-A4
B4=3.3
RCT=A4*T2
RCT=RCT+B4
GO TO 100
50 A5=2.21*-3
A5=-A5
B5=3.4
RCT=A5*T2
RCT=RCT+B5
GO TO 100
60 A6=0
A6=-A6
B6=1*-1
RCT=A6*T2
RCT=RCT+B6

100 H=1/RCT
F=H
RETURN
END
```

```
;RCE(E/T) POUR UNE TOLE REVETUE
;valeurs Gilles DP600
```

```
; 50 2.92*-4 150 2.41*-4 250 2.51*-4 --
;400 2.12*-4 490 1.02*-4 --
```

```
2/FORTRAN
```



```

FUNCTION F(W)
DIMENSION W(4)
T2=W(1)
F=0
IF(T2.GT.1535) GO TO 60
IF(T2.GT.550) GO TO 50
IF(T2.GT.402) GO TO 40
IF(T2.GT.203) GO TO 30
IF(T2.GT.101) GO TO 20
IF(T2.GT.20) GO TO 10

A0=0
A0=-A0
B0=1.37*-4
R=A0*T2
R=R+B0
GO TO 100

10 A1=4.486*-7
A1=-A1
B1=1.466*-4
R=A1*T2
R=R+B1
GO TO 100

20 A2=8.984*-9
A2=-A2
B2=1.021*-4
R=A2*T2
R=R+B2
GO TO 100

30 A3=2.316*-7
A3=-A3
B3=1.474*-4
R=A3*T2
R=R+B3
GO TO 100

40 A4=1.766*-7
A4=-A4
B4=1.253*-4
R=A4*T2
R=R+B4
GO TO 100

50 A5=2.840*-8
A5=-A5
B5=4.369*-5
R=A5*T2
R=R+B5
GO TO 100

60 A6=0
A6=-A6
B6=1*-7
R=A6*T2
R=R+B6

100 F=R
RETURN
END

;Calcul coeff KT convecto-radiatif sur l'ELECTRODE
50/ FORTRAN
FUNCTION F(W)
DIMENSION W(5)
TE=W(5)
SIG=5.67*-14
EPS=0.3
TO=293.15

```

```

TP=TE+273.15
TO2=TO*TO
TP2=TP*TP
TMP1=TO+TP
TMP2=TO2+TP2
TMP=TMP2*TMP1
EPSIG=SIG*EPS
FR=EPSIG*TMP

L=22.07
K=0.59
L2=L*L
L3=L2*L
Pr=0.71
Gr=0.6*-1
Gr=Gr*L3
TO=-TO
TPO=TP+TO
Gr=Gr*TPO
Ra=Gr*Pr
Ra=Ra**0.25
Nu=K*Ra
FCV=0.0000307*Nu
FCV=FCV/L

F=FR+FCV
RETURN
END

```

; pas de courant applique
70/ 1 (0 0) (0.001 0) (2 0) (5 0) (1000 0)

;Calcul coeff KT convecto-radiatif sur la TOLE superieure

```

80/ FORTRAN
FUNCTION F(W)
DIMENSION W(5)
TE=W(5)
SIG=5.67*-14
EPS=0.8
TO=293.15
TP=TE+273.15
TO2=TO*TO
TP2=TP*TP
TMP1=TO+TP
TMP2=TO2+TP2
TMP=TMP2*TMP1
EPSIG=SIG*EPS
FR=EPSIG*TMP

L=19
K=0.54
L2=L*L
L3=L2*L
Pr=0.71
Gr=0.6*-1
Gr=Gr*L3
TO=-TO
TPO=TP+TO
Gr=Gr*TPO
Ra=Gr*Pr
Ra=Ra**0.25
Nu=K*Ra
FCV=0.0000307*Nu
FCV=FCV/L

F=FR+FCV
RETURN
END

```

;Calcul coeff KT convecto-radiatif sur la TOLE inferieure
81/ FORTRAN

```

FUNCTION F(W)
DIMENSION W(5)
TE=W(5)
SIG=5.67*-14
EPS=0.8
TO=293.15
TP=TE+273.15
TO2=TO*TO
TP2=TP*TP
TMP1=TO+TP
TMP2=TO2+TP2
TMP=TMP2*TMP1
EPSIG=SIG*EPS
FR=EPSIG*TMP

L=19
K=0.27
L2=L*L
L3=L2*L
Pr=0.71
Gr=0.6*-1
Gr=Gr*L3
TO=-TO
TPO=TP+TO
Gr=Gr*TPO
Ra=Gr*Pr
Ra=Ra**0.25
Nu=K*Ra
FCV=0.0000307*Nu
FCV=FCV/L

F=FR+FCV
RETURN
END

```

;Calcul coeff KT convecto-radiatif sur la TOLE de cote
82/ FORTRAN

```

FUNCTION F(W)
DIMENSION W(5)
TE=W(5)
SIG=5.67*-14
EPS=0.8
TO=293.15
TP=TE+273.15
TO2=TO*TO
TP2=TP*TP
TMP1=TO+TP
TMP2=TO2+TP2
TMP=TMP2*TMP1
EPSIG=SIG*EPS
FR=EPSIG*TMP

L=2
K=0.59
L2=L*L
L3=L2*L
Pr=0.71
Gr=0.6*-1
Gr=Gr*L3
TO=-TO
TPO=TP+TO
Gr=Gr*TPO
Ra=Gr*Pr
Ra=Ra**0.25
Nu=K*Ra
FCV=0.0000307*Nu
FCV=FCV/L

F=FR+FCV
RETURN
END

```

```

RETOUR
MILIEU EXTRAIRE
CONSERV DONN 100

RECH DONN 100
TRANSITOIRE NON LINEAIRE
COMPORTEMENT METALLURGY 4 FICHER METADP600.DAT FORCE -1
ALGORITHM OPTIMISER IMPLICIT 1 ITERATION 30
METHODE OPTIMISEE NON SYMETRIQUE TEST 2
PRECISION ABSOLUE DEPLACEMENT 5 FORCE 1*-2
;PAS DTMINI 1*-13 DTMAXI 1*-2 FACC 0.5 FACP 1.2
CONDITIONS INITIALES
NOEUDS/TT=20
MAILLE GROUPE $D1$ $D2$ $D3$ $D4$ $D5$ $D6$/ P 0.8 0 0.2 0
TEMPS INITIAL 0.
0.000001/STOCKER 0
RETOUR
CONSERVER DONNEES TRANSITOIRE 100

;#ALLER 10

LIBERER 19
ASSIGNER 19 TRAN100.TIT BINAIRE
TRANSITOIRE NON LINEAIRE
COMPORTEMENT METALLURGY 4 FICHER METADP600.DAT FORCE -1
ALGORITHM OPTIMISER 3 IMPLICIT 1 ITERATION 30
METHODE NON SYMETRIQUE OPTIMISER TEST 2
PRECISION ABSOLUE DEPLACEMENT 5 FORCE 1*-2
PAS DTMINI 1*-13 DTMAXI 1*-1 FACC 0.5 FACP 1.2
CONDITION INITIALE REPRIS CARTE DERNIERE
TEMPS INITIAL REPRIS
0.1 PAS 1*-2/STOCKER 0

RETOU
CONSERVER DONNEES TRANSITOIRE 100

;MODE INTER

;-----;;
;-----;;
; Premier calcul MECA pour Maillage initiale dans calcul ETM
;-----;;
;-----;;

;POINT 10

RECH DONN 622 ASCII

$GROUPE CREE NOM L_CTC_INF_1
MAILLE GROUPE $C1$
RETOU
$GROUPE CREE NOM LEFT_SUP_2
MAILLE GROUPE $L17$
RETOU

$GROUPE CREE NOM R_CTC_INF_1
MAILLE GROUPE $C2$
RETOU
$GROUPE CREE NOM RIGHT_SUP_2
MAILLE GROUPE $L16$
MAILLE GROUPE $L15$
RETOU

$GROUPE CREE NOM CTT_SUP
MAILLE GROUPE $L11$
MAILLE GROUPE $L12$
MAILLE GROUPE $L13$
RETOU

$GROUPE CREE NOM CTT_INF

```

MAILLE GROUPE \$L5\$
 MAILLE GROUPE \$L6\$
 MAILLE GROUPE \$L7\$
 RETOU

\$GROUPE CREE NOM LEFT_INF_1
 MAILLE GROUPE \$L1\$
 RETOU
 \$GROUPE CREE NOM L_CTC_INF_2
 MAILLE GROUPE \$C3\$
 RETOU

\$GROUPE CREE NOM R_CTC_INF_2
 MAILLE GROUPE \$C4\$
 RETOU
 \$GROUPE CREE NOM RIGHT_INF_1
 MAILLE GROUPE \$L2\$
 MAILLE GROUPE \$L3\$
 RETOU

\$GROUPE CREE NOM ELECT_1
 MAILLE GROUPE \$D7\$
 MAILLE GROUPE \$D8\$
 MAILLE GROUPE \$D9\$
 MAILLE GROUPE \$D10\$
 MAILLE GROUPE \$D11\$
 MAILLE GROUPE \$D12\$
 MAILLE GROUPE \$D13\$
 MAILLE GROUPE \$D14\$
 RETOU

\$GROUPE CREE NOM ELECT_2
 MAILLE GROUPE \$D15\$
 MAILLE GROUPE \$D16\$
 MAILLE GROUPE \$D17\$
 MAILLE GROUPE \$D18\$
 MAILLE GROUPE \$D19\$
 MAILLE GROUPE \$D20\$
 MAILLE GROUPE \$D21\$
 MAILLE GROUPE \$D22\$
 RETOU

DEFINITION
 SOUDAGE-CALCUL MECA
 OPTION BIDIM AXISYME THERMO
 REPETER GEOMETRIE
 CARACTERISTIQUES

MAILLE / INTEG 2

;Proprietes Thermo-Mecanique de la TOLE en DP6G
 MAILLE GROUPE \$D1\$ \$D2\$ \$D3\$ / E 200000 NU 0.3 INTEG 2
 MAILLE GROUPE \$D4\$ \$D5\$ \$D6\$ / E 200000 NU 0.3 INTEG 2

;Proprietes Thermique-electriques de l'ELECTRODE en cuivre
 MAILLE GROUPE \$ELECT_1\$ / E 89000 NU 0.33 INTEG 2
 MAILLE GROUPE \$ELECT_2\$ / E 89000 NU 0.33 INTEG 2

LIAISONS

;UX=0 sur l'axe de symétrie
 DROITE PSI 90 PRECISION 0.001 / UX

;UY=0 sur le bas de l'electrode
 NOEU 4956 / UY
 NOEU 4960 / UY

CHARGEMENT
 1

;Pression sur le de l'electrode
 MAILLE GROUPE \$L25\$ / PY 23.87 FT 850 UNIT

```

;Gestion par des pénalités du contact mécanique
MILIEU
sl2d / CONTA $L_CTC_INF_2$ CIBLE $LEFT_INF_1$ MODEL 1 --
  penal 5 epsil 1*-4 GRPE 1
sl2d / CONTA $LEFT_INF_1$ CIBLE $L_CTC_INF_2$ MODEL 1 --
  penal 5 epsil 1*-4 GRPE 1
sl2d / CONTA $L_CTC_INF_1$ CIBLE $LEFT_SUP_2$ MODEL 1 --
  penal 5 epsil 1*-4 GRPE 1
sl2d / CONTA $LEFT_SUP_2$ CIBLE $L_CTC_INF_1$ MODEL 1 --
  penal 5 epsil 1*-4 GRPE 1
sl2d / CONTA $R_CTC_INF_1$ CIBLE $RIGHT_SUP_2$ MODEL 3 --
  penal 1.0 epsil 1*-4 GRPE 1
sl2d / CONTA $RIGHT_SUP_2$ CIBLE $R_CTC_INF_1$ MODEL 3 --
  penal 1.0 epsil 1*-4 GRPE 1
sl2d / CONTA $R_CTC_INF_2$ CIBLE $RIGHT_INF_1$ MODEL 3 --
  penal 1.0 epsil 1*-4 GRPE 1
sl2d / CONTA $RIGHT_INF_1$ CIBLE $R_CTC_INF_2$ MODEL 3 --
  penal 1.0 epsil 1*-4 GRPE 1
TABLE
850 / 1 (0 0) (0.001 -1) (0.1 -1) (10 -1)

RETOUR
CONSERV DONN 2100

ASSI 19 TRAN100.TIT BINA
TEMPERATURE TRANSITOIRE ELECTROKINETIC METALLURGIE CARTE
LIBE 19

RECHERCHER DONN 2100
MILIEU

TRANSITOIRE NON LINEAIRE STATIQUE
COMPORTEMENT PLASTIQUE METALLURGIE 6
METHODE OPTIMISEE TEST 2
ALGORITHM ITERATION 40 OPTIM 1
PRECISION ABSOLUE FORCE 2.0 DEPLACEMENTS 1*-5
;PAS DTMINI 1*-13 DTMAXI 1*-2 FACC 0.5 FACP 1.3

TEMPS INITIAL 0.
0.00000001 /STOCKER 1

RETOUR
CONSERVER DONN TRAN 2100

;#ALLER 20

LIBERER 19
ASSIGNER 19 TRAN2100.TIT
TRANSITOIRE NON LINEAIRE STATIQUE
COMPORTEMENT PLASTIQUE METALLURGIE 6
METHODE OPTIMISEE TEST 2
ALGORITHM ITERATION 40 OPTIM 1
PRECISION ABSOLUE FORCE 2.0 DEPLACEMENTS 1*-5
PAS DTMIN 1*-13 DTMAXI 1*-4 FACC 0.5 FACP 1.3 FORCER DESACTIVER
CONDITION INITIALE REPRISE CARTE DERNIERE
TEMPS INITIAL REPRISE
; 0.00101 PAS 5*-5/STOCKER 0
0.1 PAS 1*-7/STOCKER 1

RETOUR
CONSERVER DONN TRAN 2100

```

3. Progamme Thermo Elastique ABAQUS

➤ Force

```

** les coordonnes des neoud et leurs noms en 2D
*NODE,INPUT=mesh_titus.nod,NSET=all_nodes
**element 4 les noeuds lui appartenant
*ELEMENT,TYPE=CAX4,INPUT=mesh_titus.elt4,ELSET=e4
**element 3 les numeros des noeuds lui appartenant
*ELEMENT,TYPE=CAX3,INPUT=mesh_titus.elt3,ELSET=e3
** e3 et e4 appartient all_elts
*ELSET,ELSET=all_elts
e3,e4
** element 1 a 1099 c'est du CuCrZr (notre echantillon)
*ELSET,ELSET=CuCrZr,GENERATE
1,1099,1
**element 1100 a 1665 c'est le doit ui tient l'eprouvette de Cu
*ELSET,ELSET=doigtCu,GENERATE
1100,1665,1
**element 1666 a 2231 c'est le doigt qui tient la pastille de Mo
*ELSET,ELSET=doigtMo,GENERATE
1666,2231,1
** element 2232 a 5050 c'est la pastille de molyb
*ELSET,ELSET=molyb,GENERATE
2232,5050,1
** element 5051 a 5650 c'est le mors qui tient doigtCu
*ELSET,ELSET=morsCu,GENERATE
5051,5650,1
** element 5651 a 6250 c'est le mors qui tient doigtMo
*ELSET,ELSET=morsMo,GENERATE
5651,6250,1
**le corps coppe1 comprends les deux doigt et les deux mors
*ELSET,ELSET=coppel
doigtCu,doigtMo,morsCu,morsMo
** les differentes couture réalisé entre le doigt de Cu et l'echantillon ainsi
** que dans le doigt de mo
*INCLUDE,INPUT=coutures.txt
** la face de l'echantillon electrode va de l element 243 a 302
*ELSET,ELSET=e_faceelectrode,GENERATE
243,302,1
** les elements de faceelectrode sont du S4
*SURFACE,NAME=faceelectrode,TYPE=ELEMENT
e_faceelectrode,S4
*ELSET,ELSET=e_faceelectrod2,GENERATE
1062,1077,1
*SURFACE,NAME=faceelectrod2,TYPE=ELEMENT
1024,S2
e_faceelectrod2,S2
*ELSET,ELSET=e_facemolybdene,GENERATE
3415,4570,15
*SURFACE,NAME=facemolybdene,TYPE=ELEMENT
e_facemolybdene,S3
*CONTACT PAIR,INTERACTION=frott
faceelectrode,facemolybdene
*CONTACT PAIR,INTERACTION=frott
faceelectrod2,facemolybdene
*SURFACE INTERACTION,NAME=frott
*FRICTION
0.0
**
**
*SOLID SECTION,ELSET=coppel,MATERIAL=mat_cu
*MATERIAL,NAME=mat_cu
*ELASTIC
90000.,0.34,20.
40000.,0.37,700.
**
**
*SOLID SECTION,ELSET=CuCrZr,MATERIAL=m_cucrZR
*MATERIAL,NAME=m_cucrZR
*ELASTIC
90000.,0.34,20.
40000.,0.37,700.

```

```

**
*SOLID SECTION,ELSET=molyb,MATERIAL=mat_mo
*MATERIAL,NAME=mat_mo
*ELASTIC
370000.,0.29,20.
100000.,0.29,1000.
**
*NSET,NSET=axeZ
314,1794,1876,1877,1878,3867
*NSET,NSET=zEQ1
351, 410, 411, 352
4219, 4235, 4236, 4220
*ELSET,ELSET=z_cu
280,3745
*NSET,NSET=bot,GENERATE
1876,1966,9
*NSET,NSET=top,GENERATE
1794,1875,9
*EQUATION
2
top,2,+1.,1785,2,-1
**
*BOUNDARY
axeZ,1
bot,2
*INITIAL CONDITIONS,TYPE=TEMPERATURE
all_nodes,20.
**
step 1
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.001,.02
*BOUNDARY
937,2,2,-0.02
*TEMPERATURE
all_nodes,20.
*NODE PRINT,NSET=zEQ1
U,NT
*NODE PRINT,NSET=bot,TOTAL=YES
RF
*EL PRINT,ELSET=z_cu,POS=CENTROID,SUM=NO
S,E
*END STEP
**
step 2
*STEP,AMPLITUDE=RAMP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.01,.08
*BOUNDARY,OP=NEW
bot,2
*CLOAD
937,2,-2100.
*TEMPERATURE
all_nodes,20.
*NODE PRINT,NSET=zEQ1
U,NT
*NODE PRINT,NSET=bot,TOTAL=YES
RF
*EL PRINT,ELSET=z_cu,POS=CENTROID,SUM=NO
S,E
*END STEP
**
step 3
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.001,0.01
*CLOAD
937,2,-2100.
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_001s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT
*ELEMENT OUTPUT
PE,S

```



```

*END STEP
** _____ step 4 _____
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.01,.1
*CLOAD
937,2,-2100.
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_002s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT
*ELEMENT OUTPUT
PE,S
*END STEP
** _____ step 5 _____
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.01,.1
*CLOAD
937,2,-2100.
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_003s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT
*ELEMENT OUTPUT
PE,S
*END STEP
** _____ step 6 _____
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.01,.1
*CLOAD
937,2,-2100.
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_004s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT
*ELEMENT OUTPUT
PE,S
*END STEP
** _____ step 7 _____
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.01,.1
*CLOAD
937,2,-2100.
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_006s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT
*ELEMENT OUTPUT
PE,S
*END STEP
** _____ step 8 _____
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.01,.1
*CLOAD
937,2,-0.05
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_013s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT
*ELEMENT OUTPUT
PE,S
*END STEP
** _____ step 9 _____
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.01,.1
*CLOAD

```

```

937,2,.0
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_020s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT
*ELEMENT OUTPUT
PE,S
*END STEP
** _____step 10_____
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.01,.1
*CLOAD
937,2,.0
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_040s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT
*ELEMENT OUTPUT
PE,S
*END STEP
** _____step 11_____
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.01,.1
*CLOAD
937,2,.0
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_100s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT
*ELEMENT OUTPUT
PE,S
*END STEP

```

➤ Pressure

```

** les coordonnes des neoud et leurs noms en 2D
*NODE,INPUT=mesh_titus.nod,NSET=all_nodes
**element 4 les noeuds lui appartenant
*ELEMENT,TYPE=CAX4,INPUT=mesh_titus.elt4,ELSET=e4
**element 3 les numeros des noeuds lui appartenant
*ELEMENT,TYPE=CAX3,INPUT=mesh_titus.elt3,ELSET=e3
** e3 et e4 appartient all_elts
*ELSET,ELSET=all_elts
e3,e4
** element 1 a 1099 c'est du CuCrZr (notre echantillon)
*ELSET,ELSET=CuCrZr,GENERATE
1,1099,1
**element 1100 a 1665 c'est le doit ui tient l'eprouvette de Cu
*ELSET,ELSET=doigtCu,GENERATE
1100,1665,1
**element 1666 a 2231 c'est le doigt qui tient la pastille de Mo
*ELSET,ELSET=doigtMo,GENERATE
1666,2231,1
** element 2232 a 5050 c'est la pastille de molyb
*ELSET,ELSET=molyb,GENERATE
2232,5050,1
** element 5051 a 5650 c'est le mors qui tient doigtCu
*ELSET,ELSET=morsCu,GENERATE
5051,5650,1
** element 5651 a 6250 c'est le mors qui tient doigtMo
*ELSET,ELSET=morsMo,GENERATE
5651,6250,1
**le corps coppe1 comprends les deux doigt et les deux mors
*ELSET,ELSET=coppel
doigtCu,doigtMo,morsCu,morsMo
** les differentes couture réalisé entre le doigt de Cu et l'echantillon ainsi
** que dans le doigt de mo
*INCLUDE,INPUT=coutures.txt

```

```

** la face de l'echantillon electrode va de l element 243 a 302
*ELSET,ELSET=e_faceelectrode,GENERATE
243,302,1
** les elements de faceelectrode sont du S4
*SURFACE,NAME=faceelectrode,TYPE=ELEMENT
e_faceelectrode,S4
*ELSET,ELSET=e_faceelectrod2,GENERATE
1062,1077,1
*SURFACE,NAME=faceelectrod2,TYPE=ELEMENT
1024,S2
e_faceelectrod2,S2
*ELSET,ELSET=e_facemolybdene,GENERATE
3415,4570,15
*SURFACE,NAME=facemolybdene,TYPE=ELEMENT
e_facemolybdene,S3
*CONTACT PAIR,INTERACTION=frott
faceelectrode,facemolybdene
*CONTACT PAIR,INTERACTION=frott
faceelectrod2,facemolybdene
*SURFACE INTERACTION,NAME=frott
*FRICTION
0.0
**
*SOLID SECTION,ELSET=coppel,MATERIAL=mat_cu
*MATERIAL,NAME=mat_cu
*ELASTIC
90000.,0.34,20.
40000.,0.37,700.
**
*SOLID SECTION,ELSET=CuCrZr,MATERIAL=m_cucrzt
*MATERIAL,NAME=m_cucrzt
*ELASTIC
90000.,0.34,20.
40000.,0.37,700.
**
*SOLID SECTION,ELSET=molyb,MATERIAL=mat_mo
*MATERIAL,NAME=mat_mo
*ELASTIC
370000.,0.29,20.
100000.,0.29,1000.
**
*NSET,NSET=axeZ
314,1794,1876,1877,1878,3867
*NSET,NSET=zEQ1
351,410,411,352
4219,4235, 4236,4220
*ELSET,ELSET=z_cu
280,3745
*NSET,NSET=bot,GENERATE
1876,1966,9
*NSET,NSET=top,GENERATE
1794,1875,9
*EQUATION
2
top,2,+1.,1785,2,-1
**
*BOUNDARY
axeZ,1
bot,2
*INITIAL CONDITIONS,TYPE=TEMPERATURE
all_nodes,20.
** step 1
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.001,.02
*BOUNDARY
1785,2,2,-0.06
*TEMPERATURE
all_nodes,20.
*NODE PRINT,NSET=zEQ1
U,NT

```

```

*NODE PRINT,NSET=bot,TOTAL=YES
RF
*EL PRINT,ELSET=z_cu,POS=CENTROID,SUM=NO
S,E
*END STEP
** _____ step 2 _____
*STEP,AMPLITUDE=RAMP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.01,.08
*BOUNDARY,OP=NEW
bot,2
*DLOAD
1593,P3,26.21
1601,P3,26.21
1609,P3,26.21
1617,P3,26.21
1625,P3,26.21
1633,P3,26.21
1641,P3,26.21
1649,P3,26.21
1659,P3,26.21
1665,P3,26.21
*TEMPERATURE
all_nodes,20.
*NODE PRINT,NSET=zEQ1
U,NT
*NODE PRINT,NSET=bot,TOTAL=YES
RF
*EL PRINT,ELSET=z_cu,POS=CENTROID,SUM=NO
S,E
*END STEP
** _____
*INCLUDE,input=bb.inp

```

bb.inp

```

*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.001,0.01
*DLOAD
1593,P3,26.21
1601,P3,26.21
1609,P3,26.21
1617,P3,26.21
1625,P3,26.21
1633,P3,26.21
1641,P3,26.21
1649,P3,26.21
1659,P3,26.21
1665,P3,26.21
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_001s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT
*ELEMENT OUTPUT
PE,S
*END STEP
** _____ step 3 _____
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.01,.1
*DLOAD
1593,P3,26.21
1601,P3,26.21
1609,P3,26.21
1617,P3,26.21
1625,P3,26.21
1633,P3,26.21
1641,P3,26.21
1649,P3,26.21
1659,P3,26.21

```

```

1665,P3,26.21
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_002s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT
*ELEMENT OUTPUT
PE,S
*END STEP
** _____step 4_____
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.01,.1
*DLOAD
1593,P3,26.21
1601,P3,26.21
1609,P3,26.21
1617,P3,26.21
1625,P3,26.21
1633,P3,26.21
1641,P3,26.21
1649,P3,26.21
1659,P3,26.21
1665,P3,26.21
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_003s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT
*ELEMENT OUTPUT
PE,S
*END STEP
** _____step 5_____
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.01,.1
*DLOAD
1593,P3,26.21
1601,P3,26.21
1609,P3,26.21
1617,P3,26.21
1625,P3,26.21
1633,P3,26.21
1641,P3,26.21
1649,P3,26.21
1659,P3,26.21
1665,P3,26.21
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_004s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT
*ELEMENT OUTPUT
PE,S
*END STEP
** _____step 6_____
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.01,.1
*DLOAD
1593,P3,26.21
1601,P3,26.21
1609,P3,26.21
1617,P3,26.21
1625,P3,26.21
1633,P3,26.21
1641,P3,26.21
1649,P3,26.21
1659,P3,26.21
1665,P3,26.21
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_006s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT

```

```

*ELEMENT OUTPUT
PE,S
*END STEP
**_____step 7_____
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.01,.,1
*DLOAD
1593,P3,0.1
1601,P3,0.1
1609,P3,0.1
1617,P3,0.1
1625,P3,0.1
1633,P3,0.1
1641,P3,0.1
1649,P3,0.1
1659,P3,0.1
1665,P3,0.1
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_013s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT
*ELEMENT OUTPUT
PE,S
*END STEP
**_____step 8_____
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.01,.,1
*DLOAD
1593,P3,0.1
1601,P3,0.1
1609,P3,0.1
1617,P3,0.1
1625,P3,0.1
1633,P3,0.1
1641,P3,0.1
1649,P3,0.1
1659,P3,0.1
1665,P3,0.1
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_020s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT
*ELEMENT OUTPUT
PE,S
*END STEP
**_____step 9_____
*STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
.01,.,1
*DLOAD
1593,P3,0.1
1601,P3,0.1
1609,P3,0.1
1617,P3,0.1
1625,P3,0.1
1633,P3,0.1
1641,P3,0.1
1649,P3,0.1
1659,P3,0.1
1665,P3,0.1
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_040s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT
*ELEMENT OUTPUT
PE,S
*END STEP
**_____step 10_____
*STEP,INC=10000,NLGEOM

```

```

*STATIC
.01,.1
*DLOAD
1593,P3,0.1
1601,P3,0.1
1609,P3,0.1
1617,P3,0.1
1625,P3,0.1
1633,P3,0.1
1641,P3,0.1
1649,P3,0.1
1659,P3,0.1
1665,P3,0.1
*TEMPERATURE,INPUT=NT11_100s.txt
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT
U,NT
*ELEMENT OUTPUT
PE,S
*END STEP

```

4. Programme Thermo Elastique SYSWELD

```

;SIMULATION ESSAI GLEEBLE avec ELECTRODE face active plate (Rc=1.5), MOR EN CU,
;      ELECTRODE refroidit par conduction
;pas de métallurgie
;TEMPÉRATURE REGULEE au niveau du cone de la pièce en Mo
;TEMPERATURE IMPOSEE SUR LA SURFACE DES MORS
;I REGULE JJ=11 A/mm2
;cond électrique (et donc thermique aussi) de Nouredine
;pas de rayonnement hr
;pas de RCE[LET2E]
;avec RCT valeur contante 250 K.mm2 (mauvais contact éprouvette / mors)
;Maillage grossier

;montée à 700°C en 3s + palier de 10s + refroidissement

RECH DONN 611
RECLASS ITER 10
RETOU
RECLASS ITER 10
RETOU

MODE BATCH

$GROUPE CREE NOM CPMSUP_P
MAILLE GROUPE $L14$
RETOU
$GROUPE CREE NOM CPMSUP_M
MAILLE GROUPE $L84$
RETOU

$GROUPE CREE NOM CTMINF_T
MAILLE GROUPE $L33$
RETOU
$GROUPE CREE NOM CTMINF_M
MAILLE GROUPE $L88$
RETOU

$GROUPE CREE NOM CPESUP_P
MAILLE 6444 6443
RETOU
;MAILLE GROUPE $L9$
;RETOU

$GROUPE CREE NOM CPESUP_E
MAILLE 6383 6382
RETOU
;MAILLE GROUPE $L251$
;RETOU

```

\$GROUPE CREE NOM CPEINF_P
 MAILLE GROUPE \$L75\$ \$L74\$
 RETOU
 \$GROUPE CREE NOM CPEINF_E
 MAILLE GROUPE \$C1\$ \$C2\$
 RETOU

\$GROUPE CREE NOM CPPINF_M
 MAILLE GROUPE \$L65\$
 RETOU
 \$GROUPE CREE NOM CPPINF_C
 MAILLE GROUPE \$L38\$
 RETOU

\$GROUPE CREE NOM ELEC
 MAILLE GROUPE \$D11\$ \$D12\$ \$D13\$ \$D14\$
 MAILLE GROUPE \$D15\$ \$D16\$ \$D17\$ \$D18\$ \$D19\$
 RETOU

\$GROUPE CREE NOM MOR
 MAILLE GROUPE \$D43\$ \$D42\$
 RETOU

\$GROUPE CREE NOM PELECH
 MAILLE GROUPE \$D1\$ \$D2\$ \$D3\$ \$D4\$ \$D5\$ \$D6\$ \$D7\$ \$D8\$
 RETOU

\$GROUPE CREE NOM PELECB
 MAILLE GROUPE \$D21\$ \$D22\$ \$D23\$ \$D24\$
 MAILLE GROUPE \$D25\$ \$D26\$ \$D27\$ \$D28\$
 RETOU

\$GROUPE CREE NOM PMO
 MAILLE GROUPE \$D31\$ \$D32\$ \$D33\$ \$D34\$ \$D35\$ \$D36\$
 MAILLE GROUPE \$D37\$ \$D38\$ \$D39\$ \$D40\$ \$D41\$
 RETOU

;SIMULATION ESSAI GLEEBLE Diam 6, MOR EN CU : phase de montée en température
 DEFINI
 ELECTRODE MORS CU PIECEB MOLYBDENE
 OPTION THERMI ELECTROCINE AXISYME
 REPETER GEOME
 CARACTERISTIQUES

;Proprietes Thermique-Metallurgique-Electrique des mors en cu
 MAILLE GROUPE \$MOR\$ /KX KY -20 RHO -21 C -22 SIGX SIGY -23

;Proprietes Thermique-electriques de l'Electrode en cucr
 MAILLE GROUPE \$ELEC\$ /KX KY -24 RHO -25 C -26 SIGX SIGY -28

;Proprietes Thermique-electriques de la pièce haut en cucr
 MAILLE GROUPE \$PELECH\$ /KX KY -24 RHO -25 C -26 SIGX SIGY -28

;Proprietes Thermique-electriques du tube bas en cucr
 MAILLE GROUPE \$PELECB\$ /KX KY -24 RHO -25 C -26 SIGX SIGY -28

;Proprietes Thermique-electriques de l'pièce bas en molybdene
 MAILLE GROUPE \$PMO\$ /KX KY -29 RHO -30 C -31 SIGX SIGY -32

;Effusivites mailles peau interfaces
 MAILLE GROUPE \$CPMSUP_P\$ / KX 1 RHO 1 C 1
 MAILLE GROUPE \$CPMSUP_M\$ / KX 1 RHO 1 C 1

MAILLE GROUPE \$CTMINF_T\$ / KX 1 RHO 1 C 1
 MAILLE GROUPE \$CTMINF_M\$ / KX 1 RHO 1 C 1

MAILLE GROUPE \$CPESUP_P\$ / KX 1 RHO 1 C 1
 MAILLE GROUPE \$CPESUP_E\$ / KX 1 RHO 1 C 1

MAILLE GROUPE \$CPEINF_P\$ / KX 1 RHO 1 C 1

MAILLE GROUPE \$CPEINF_E\$/ KX 1 RHO 1 C 1

MAILLE GROUPE \$CPPINF_M\$/ KX 1 RHO 1 C 1

MAILLE GROUPE \$CPPINF_C\$/ KX 1 RHO 1 C 1

MILIEU

CNT/ SURA \$CPMSUP_P\$ SURB \$CPMSUP_M\$ CONSI 1 H -1 GRPE 1

CNT/ SURA \$CTMINF_T\$ SURB \$CTMINF_M\$ CONSI 1 H -1 GRPE 1

CNT/ SURA \$CPESUP_P\$ SURB \$CPESUP_E\$ CONSI 1 GRPE 1

CNTG/ SURA \$CPEINF_P\$ SURB \$CPEINF_E\$ CONSI 0.09 H -5 R -6 GRPE 1

CNT/ SURA \$CPPINF_M\$ SURB \$CPPINF_C\$ CONSI 1 H -5 R -6 GRPE 1

; Régulation sur noeud pièce Mo au centre

REGULATION / NOEUD 764 DEPL 1 --

TABLE 2 COMPOSANTE 3 CONSIGNE 4

LIAISONS

; potentiel et température imposés sur le mor inférieur

NOEU GROUPE \$L86\$/ TT VV

; température imposée sur le mor supérieur

NOEU GROUPE \$L82\$/ TT

CHARGEMENT

1

; température imposée sur les mors

NOEU GROUPE \$L82\$ \$L86\$/ TT 20

; potentiel imposé sur le mor inférieur

NOEUD GROUPE \$L86\$/ VV 0

; courant imposé sur mor supérieur

MAILLE GROUPE \$L82\$/ JJ 10 FT 2

TABLE

; Propriétés MOR CUIVRE OFHC

20/ 1 (0 0.3945) (20 0.394) (200 0.389) (538 0.341) (1037 0.244)

* (1085 0.1656) (1100 0.1661) (1200 0.1701) (1400 0.1763)

* (1600 0.1804)

21/ 1 (0 8929*-9) (20 8920*-9) (127 8869*-9) (227 8819*-9)

* (327 8767*-9) (427 8712*-9) (527 8653*-9) (627 8587*-9)

* (727 8515*-9) (927 8354*-9) (1027 8275*-9) (1084.8 8275*-9)

* (1227 8275*-9) (1527 8275*-9)

22/ 1 (0 389.8) (27 392.4) (427 430.4) (627 465.8) (927 508.7)

*(1084.8 2779.4) (1227 543.8) (1527 543.8)

23/ 1 (0 61954) (20 59172) (200 34130) (497 21739) (977 12346)

* (1084.8 5000) (1100 4950) (1200 4717) (1400 4292) (1600 3953)

; Propriétés ELECTRODE CUCRZR

; conductivité thermique

24/ 1 (0 0.290) (51 0.310) (102 0.317)(151 0.320) (200 0.324)

* (249 0.324) (300 0.327) (352 0.327)(402 0.326) (499 0.317)

* (599 0.313) (700 0.309) (799 0.288)(900 0.256) (920 0.248)

; masse volumique

25/ 1 (0 8900*-9) (200. 8720*-9) (400. 8540*-9) (600. 8360*-9)

* (800 8180*-9)

; Cp

26/ 1 (100 392.8) (200 406)(300 417.3)(400 427.2)(500 435)(600 437)

* (700 436)(800 433)

; conductivité électrique (Nouredine 2009)

28/ 1 (0 0.43560*5) (51 0.39304*5) (102 0.34584*5)(151 0.30953*5) (200 0.28050*5)

* (249 0.25455*5) (300 0.23407*5) (352 0.21489*5)(402 0.19810*5) (499 0.16854*5)
 * (599 0.14707*5) (700 0.13022*5) (799 0.11028*5)(900 0.08933*5) (920 0.8531*5)

;Proprietes PIECE BAS en molybdene

; conductivite thermique
 29/ 1 (20 0.142) (27 0.138) (100 0.138) (127 0.134) (500 0.121) (527 0.118)
 * (927 0.105) (1000 0.105) (1327 0.0946) (1500 0.084) (1727 0.088)

; masse volumique
 30/ 1 (0 10000*-9) (1000. 10000*-9)

; Cp
 31/ 1 (20 247) (100 5260) (500 285) (1000 310) (1500 339)

; conductivite electrique (Nouredine 2009)
 32/ 1 (20 17544) (27 18116) (100 13158) (127 12469) (500 5681)
 * (527 5434) (1000 3225) (1500 2173) (2500 1298)

;Proprietes de l'interface ELECTRODE/MORS

;RCT(E/M) constante 500 K.mm²

1/FORTRAN
 FUNCTION F(W)
 DIMENSION W(4)
 T2=W(2)

A0=0
 A0=-A0
 B0=10
 RCT=A0*T2
 RCT=RCT+B0
 GO TO 100

100 H=1/RCT
 F= H
 RETURN
 END

;Proprietes de l'interface ELECTRODE/MORS

;RCE(E/M) constante 500 K.mm²

7/FORTRAN
 FUNCTION F(W)
 DIMENSION W(4)
 T2=W(2)

B0=0.00001
 RCE=B0
 GO TO 100

100 F= RCE
 RETURN
 END

;RCT(T) Electrode W / Rivet Cu

5/FORTRAN
 FUNCTION F(W)
 DIMENSION W(7)
 T1=W(1)
 T2=W(2)
 Tmoy= T1 + T2
 Tmoy= Tmoy *0.5
 Tmax=W(5)
 F=0

IF(Tmax.GT.1084) GO TO 80
 IF(Tmax.GT.485) GO TO 70
 IF(Tmax.GT.436) GO TO 60
 IF(Tmax.GT.395) GO TO 50
 IF(Tmax.GT.272) GO TO 40
 IF(Tmax.GT.151) GO TO 30

```

IF(Tmax.GT.119) GO TO 20
IF(Tmax.GT.85) GO TO 10

; Tmax se trouve entre 0°C et 85°C
; Extrapolation linéaire vers 0°C des premieres mesures
A0= 2.68753*-2
A0= -A0
B0= 15.08472
RCT= A0 * Tmax
RCT= RCT+B0
GO TO 90

; Tmax se trouve entre 85°C et 119°C
10 A1= 1.11689*-2
A1= -A1
B1= 13.74967
RCT= A1 * Tmax
RCT= RCT+B1
GO TO 90

; Tmax se trouve entre 119°C et 151°C
20 A2= 2.85770*-2
A2= -A2
B2= 15.82124
RCT= A2 * Tmax
RCT= RCT+B2
GO TO 90

; Tmax se trouve entre 151°C et 272°C
30 A3= 1.06857*-2
A3= -A3
B3= 13.11966
RCT= A3 * Tmax
RCT= RCT+B3
GO TO 90

; Tmax se trouve entre 272°C et 395°C
40 A4= 1.87248*-2
A4= -A4
B4= 15.30629
RCT= A4 * Tmax
RCT= RCT+B4
GO TO 90

; Tmax se trouve entre 395°C et 436°C
50 A5= 6.82883*-2
A5= -A5
B5= 34.88387
RCT= A5 * Tmax
RCT= RCT+B5
GO TO 90

; Tmax se trouve entre 436°C et 485°C
60 A6= 1.68936*-2
A6= -A6
B6= 12.4758
RCT= A6 * Tmax
RCT= RCT+B6
GO TO 90

; Tmax se trouve entre 485°C et Tfusion Cu (1084°C)
; Soit on choisi de maintenir la derniere valeur
70 A7= 7.005610*-03
A7= -A7
B7= 7.679721*00
RCT= A7 * Tmax
RCT= RCT+B7
GO TO 90

; Tmax se trouve au dessus de Tfusion Cu (1084°C)

```

; Très petite valeur de RCT pour signifier conductance infinie
 80 RCT= 8.564000*-02
 GO TO 90

90 H= 1/RCT
 F= H
 RETURN
 END

; RCE(T) Electrode W / Rivet Cu

6/FORTRAN
 FUNCTION F(W)
 DIMENSION W(7)
 T1=W(1)
 T2=W(2)
 Tmoy= T1 + T2
 Tmoy= Tmoy + 0.5
 Tmax=W(5)
 F= 0

;IF(Tmax.GT.1084) GO TO 70
 IF(Tmax.GT.439) GO TO 60
 IF(Tmax.GT.223) GO TO 50
 IF(Tmax.GT.148) GO TO 40
 IF(Tmax.GT.93) GO TO 30
 IF(Tmax.GT.60) GO TO 20
 IF(Tmax.GT.31) GO TO 10

; Tmax se trouve entre 0°C et 31°C
 ; Extrapolation linéaire vers 0°C des premières mesures
 A0= 4.87353*-6
 A0= -A0
 B0= 1.47875*-3
 RCE= A0 * Tmax
 RCE= RCE + B0
 GO TO 80

; Tmax se trouve entre 31°C et 60°C
 ; Interpolation linéaire
 10 A1= 1.85263*-5
 A1= -A1
 B1= 1.90199*-3
 RCE= A1 * Tmax
 RCE= RCE + B1
 GO TO 80

; Tmax se trouve entre 60°C et 93°C
 ; Interpolation linéaire
 20 A2= 9.96642*-6
 A2= -A2
 B2= 1.38839*-3
 RCE= A2 * Tmax
 RCE= RCE + B2
 GO TO 80

; Tmax se trouve entre 93°C et 148°C
 ; Interpolation linéaire
 30 A3= 4.13586*-6
 A3= -A3
 B3= 8.46153*-4
 RCE= A3 * Tmax
 RCE= RCE + B3
 GO TO 80

; Tmax se trouve entre 148°C et 223°C
 ; Interpolation linéaire
 40 A4= 1.57301*-6
 A4= -A4
 B4= 4.66850*-4
 RCE= A4 * Tmax

```

RCE= RCE + B4
GO TO 80

; Tmax se trouve entre 223°C et 485°C
; Interpolation linéaire
50 A5= 4.34626*-7
A5= -A5
B5= 2.12991*-4
RCE= A5 * Tmax
RCE= RCE + B5
GO TO 80

; Tmax se trouve entre 485°C et 1084°C
60 RCE= 2.19739*-05
GO TO 80
;A6= 3.595455*-09
;A6= -A6
;B6= 3.941425*-06
;RCE= A6 * Tmax
;RCE= RCE + B6

; Tmax se trouve au dessus de 1084°C
; 70 RCE= 4.395260*-08
; GO TO 80

80 F= RCE
RETURN
END

; Table du courant
2/ 1 1 1

;Consigne

4/FORTRAN
FUNCTION F(X)
DIMENSION X(8)
T=X(2)
Tp=X(1)
Tp1=3.1
Tp2=0.1
A=236.667
B=-3.6677
TM=A*Tp
TM=TM+B
T1=TM-40

T2=730
T3=690
F=0

IF(Tp.GT.Tp2) GO TO 200

Kp=0
GO TO 50

200 IF(Tp.GT.Tp1) GO TO 100

IF(T.GT.TM) GO TO 10
IF(T.GT.T1) GO TO 20

Kp=1
GO TO 50

10 Kp=0
GO TO 50

20 C=0.025
D=C*T1
D=D+1
C=-C

```

```

Kp=C*T
Kp=Kp+D
GO TO 50

100 IF(T.GT.T2) GO TO 30
   IF(T.GT.T3) GO TO 40

   Kp=1
   GO TO 50

30 Kp=0
   GO TO 50

40 A=0.025
   A=-A
   Kp=A*T
   Kp=Kp+18.25
   GO TO 50

50 F=Kp
   RETURN
   END

RETOUR
MILIEU EXTRAIRE
CONSERV DONN MILIEU 35

;PROCEDURE DE RECLESSEMENT
RECHERCHER DONNEES MILIEUX 35
RECLASSER MILIEU ITERATION 10
RETOUR
CONSERVER DONNEES MILIEU 35
;PROCEDURE DE RECLESSEMENT
RECHERCHER DONNEES MILIEUX 35
RECLASSER MILIEU ITERATION 10
RETOUR
CONSERVER DONNEES MILIEU 35

RECH DONN 35
TRANSITOIRE NON LINEAIRE
ALGORITHM OPTIMISER IMPLICIT 1 ITERATION 30
METHODE NON SYMETRIQUE OPTIMISER TEST 2
PRECISION ABSOLUE DEPLACEMENT 1 FORCE 1*-2
CONDITIONS INITIALES
  NOEUDS/TT=20
  TEMPS INITIAL 0
  0.000001/STOCKER 1
RETOUR
CONSERVER DONNEES TRANSITOIRE 35

LIBERER 19
ASSIGNER 19 TRAN35.TIT BINAIRE
TRANSITOIRE NON LINEAIRE
ALGORITHM OPTIMISER 3 IMPLICIT 1 ITERATION 50
METHODE NON SYMETRIQUE OPTIMISER TEST 2
PRECISION ABSOLUE DEPLACEMENT 2 FORCE 1*-2
PAS DTMINI 5*-7 DTMAXI 1*-3 FACC 0.5 FACP 1.5 FORCER DESACTIVER
CONDITION INITIALE REPRISE CARTE DERNIERE
TEMPS INITIAL REPRISE COMPACT
  0.001 PAS 1*-4/STOCKER 100
  0.005 PAS 1*-4/STOCKER 100
  0.01 PAS 1*-4/STOCKER 100
  0.05 PAS 1*-4/STOCKER 100
  0.1 PAS 1*-4/STOCKER 100
  0.2 PAS 1*-4/STOCKER 100
  0.3 PAS 1*-4/STOCKER 100
  0.4 PAS 1*-4/STOCKER 100
  0.5 PAS 1*-4/STOCKER 100
  0.6 PAS 1*-4/STOCKER 100
  0.7 PAS 1*-4/STOCKER 100

```

0.8 PAS 1*-4/STOCKER 100
 0.9 PAS 1*-4/STOCKER 100
 1.0 PAS 1*-4/STOCKER 100
 1.1 PAS 1*-4/STOCKER 100
 1.2 PAS 1*-4/STOCKER 100
 1.3 PAS 1*-4/STOCKER 100
 1.4 PAS 1*-4/STOCKER 100
 1.5 PAS 1*-4/STOCKER 100
 1.6 PAS 1*-4/STOCKER 100
 1.7 PAS 1*-4/STOCKER 100
 1.8 PAS 1*-4/STOCKER 100
 1.9 PAS 1*-4/STOCKER 200
 2.0 PAS 1*-4/STOCKER 200
 2.1 PAS 1*-4/STOCKER 200
 2.2 PAS 1*-4/STOCKER 200
 2.3 PAS 1*-4/STOCKER 200
 2.4 PAS 1*-4/STOCKER 200
 3 PAS 1*-4/STOCKER 200
 3.1 PAS 1*-4/STOCKER 200
 4.1 PAS 1*-4/STOCKER 200
 6.1 PAS 1*-4/STOCKER 200
 13.1 PAS 1*-4/STOCKER 200

RETOUR

CONSERVER DONNEES TRANSITOIRE 35

;SIMULATION ESSAI GLEEBLE Diam 6, MOR EN CU : phase de refroidissement
 RECH DONN 35

DEFINI

EPROUVETTE Diam 6 MOR CU
 OPTION THERMI ELECTROCINE AXISYME
 REPETER GEOME
 CARACTERISTIQUES

;Proprietes Thermique-Metallurgique-Electrique des mors en cu
 MAILLE GROUPE \$MOR\$/KX KY -20 RHO -21 C -22 SIGX SIGY -23

;Proprietes Thermique-electriques de l'Electrode en cucrzr
 MAILLE GROUPE \$ELEC\$/KX KY -24 RHO -25 C -26 SIGX SIGY -28

;Proprietes Thermique-electriques de la pièce haut en cucrzr
 MAILLE GROUPE \$PELECH\$/KX KY -24 RHO -25 C -26 SIGX SIGY -28

;Proprietes Thermique-electriques du tube bas en cucrzr
 MAILLE GROUPE \$PELECB\$/KX KY -24 RHO -25 C -26 SIGX SIGY -28

;Proprietes Thermique-electriques de l'pièce bas en molybdene
 MAILLE GROUPE \$PMO\$/KX KY -29 RHO -30 C -31 SIGX SIGY -32

;Effusivites mailles peau interfaces
 MAILLE GROUPE \$CPMSUP_P\$/ KX 1 RHO 1 C 1
 MAILLE GROUPE \$CPMSUP_M\$/ KX 1 RHO 1 C 1

MAILLE GROUPE \$CTMINF_T\$/ KX 1 RHO 1 C 1
 MAILLE GROUPE \$CTMINF_M\$/ KX 1 RHO 1 C 1

MAILLE GROUPE \$CPESUP_P\$/ KX 1 RHO 1 C 1
 MAILLE GROUPE \$CPESUP_E\$/ KX 1 RHO 1 C 1

MAILLE GROUPE \$CPEINF_P\$/ KX 1 RHO 1 C 1
 MAILLE GROUPE \$CPEINF_E\$/ KX 1 RHO 1 C 1

MAILLE GROUPE \$CPPINF_M\$/ KX 1 RHO 1 C 1
 MAILLE GROUPE \$CPPINF_C\$/ KX 1 RHO 1 C 1

MILIEU

CNT/ SURA \$CPMSUP_P\$ SURB \$CPMSUP_M\$ CONSI 10 H -1 R -7 GRPE 1
 CNT/ SURA \$CTMINF_T\$ SURB \$CTMINF_M\$ CONSI 10 H -1 R -7 GRPE 1
 CNT/ SURA \$CPESUP_P\$ SURB \$CPESUP_E\$ CONSI 10 H -1 R -7 GRPE 1
 CNTG/ SURA \$CPEINF_P\$ SURB \$CPEINF_E\$ CONSI 0.09 H -1 R -7 GRPE 1

CNT/ SURA \$CPPINF_M\$ SURB \$CPPINF_C\$ CONSI 10 H -1 R -7 GRPE 1

LIAISONS

; potentiel et température imposes sur le mor inférieur
NOEU GROUPE \$L86\$ / TT VV

; temperature imposee sur le mor superieur
NOEU GROUPE \$L82\$ / TT

CHARGEMENT

1

;temperature imposee sur les mors
NOEU GROUPE \$L82\$ \$L86\$ / TT 20

; potentiel impose sur le mor inférieur
NOEUD GROUPE \$L86\$ /VV 0

; courant impose sur mor superieur
MAILLE GROUPE \$L82\$ / JJ 0

TABLE

;Proprietes de l'interface ELECTRODE/MORS
;RCT(E/M) constante 500 K.mm²

```
1/FORTRAN
  FUNCTION F(W)
  DIMENSION W(4)
  T2=W(2)
```

```
  B0=10
  RCT=B0
  GO TO 100
```

```
100 H=1/RCT
  F= H
  RETURN
  END
```

;Proprietes de l'interface ELECTRODE/MORS
;RCE(E/M) constante

```
7/FORTRAN
  FUNCTION F(W)
  DIMENSION W(4)
  T2=W(2)
```

```
  B0=0.00001
  RCE=B0
  GO TO 100
```

```
100 F= RCE
  RETURN
  END
```

;Proprietes de l'interface ELECTRODE/MORS
;RCT(E/M) constante 1000 K.mm²

```
5/FORTRAN
  FUNCTION F(W)
  DIMENSION W(4)
  T2=W(2)
  F=0
```

```
  A0=0
  A0=-A0
  B0=4.2
  RCT=A0*T2
  RCT=RCT+B0
  GO TO 100
```


100 H=1/RCT

F=H

RETURN

END

;Proprietes MOR CUIVRE OFHC

20/ 1 (0 0.3945) (20 0.394) (200 0.389) (538 0.341) (1037 0.244)

* (1085 0.1656) (1100 0.1661) (1200 0.1701) (1400 0.1763)

* (1600 0.1804)

21/ 1 (0 8929*-9) (20 8920*-9) (127 8869*-9) (227 8819*-9)

* (327 8767*-9) (427 8712*-9) (527 8653*-9) (627 8587*-9)

* (727 8515*-9) (927 8354*-9) (1027 8275*-9) (1084.8 8275*-9)

* (1227 8275*-9) (1527 8275*-9)

22/ 1 (0 389.8) (27 392.4) (427 430.4) (627 465.8) (927 508.7)

*(1084.8 2779.4) (1227 543.8) (1527 543.8)

23/ 1 (0 61954) (20 59172) (200 34130) (497 21739) (977 12346)

* (1084.8 5000) (1100 4950) (1200 4717) (1400 4292) (1600 3953)

;Proprietes ELECTRODE CUCRZR

; conductivite thermique

24/ 1 (0 0.290) (51 0.310) (102 0.317)(151 0.320) (200 0.324)

* (249 0.324) (300 0.327) (352 0.327)(402 0.326) (499 0.317)

* (599 0.313) (700 0.309) (799 0.288)(900 0.256) (920 0.248)

; masse volumique

25/ 1 (0 8900*-9) (200. 8720*-9) (400. 8540*-9) (600. 8360*-9)

* (800 8180*-9)

; Cp

26/ 1 (100 392.8) (200 406)(300 417.3)(400 427.2)(500 435)(600 437)

* (700 436)(800 433)

; conductivite electrique (Nouredine 2009)

28/ 1 (0 0.43560*5) (51 0.39304*5) (102 0.34584*5)(151 0.30953*5) (200 0.28050*5)

* (249 0.25455*5) (300 0.23407*5) (352 0.21489*5)(402 0.19810*5) (499 0.16854*5)

* (599 0.14707*5) (700 0.13022*5) (799 0.11028*5)(900 0.08933*5) (920 0.8531*5)

;Proprietes PIECE BAS en molybdene

; conductivite thermique

29/ 1 (20 0.142) (27 0.138) (100 0.138) (127 0.134) (500 0.121) (527 0.118)

* (927 0.105) (1000 0.105) (1327 0.0946) (1500 0.084) (1727 0.088)

; masse volumique

30/ 1 (0 10000*-9) (1000. 10000*-9)

; Cp

31/ 1 (20 247) (100 5260) (500 285) (1000 310) (1500 339)

; conductivite electrique (Nouredine 2009)

32/ 1 (20 17544) (27 18116) (100 13158) (127 12469) (500 5681)

* (527 5434) (1000 3225) (1500 2173) (2500 1298)

;Calcul coeff KT convecto-radiatif sur l'EPROUVETTE

50/ FORTRAN

FUNCTION F(W)

DIMENSION W(5)

TE=W(5)

SIG=5.67*-14

EPS=0.8

TO=293.15

TP=TE+273.15

TO2=TO*TO

TP2=TP*TP

TMP1=TO+TP

TMP2=TO2+TP2

TMP=TMP2*TMP1

EPSIG=SIG*EPS

```

FR=EPSIG*TMP

FCV=0.000330

F=FR+FCV
RETURN
END

RETOUR
MILIEU EXTRAIRE
CONSERV DONN MILIEU 35

;PROCEDURE DE RECLESEMENT
RECHERCHER DONNEES MILIEUX 35
RECLASSER MILIEU ITERATION 10
RETOUR
CONSERVER DONNEES MILIEU 35
;PROCEDURE DE RECLESEMENT
RECHERCHER DONNEES MILIEUX 35
RECLASSER MILIEU ITERATION 10
RETOUR

CONSERVER DONNEES MILIEU 35
ASSIGNER 19 TRAN35.TIT BINAIRE
TRANSITOIRE NON LINEAIRE
ALGORITHM OPTIMISER 1 IMPLICIT 1 ITERATION 30
METHODE NON SYMETRIQUE OPTIMISER TEST 2
PRECISION ABSOLUE DEPLACEMENT 2 FORCE 10
PAS DTMINI 5*-9 DTMAXI 5*-2 FACC 0.5 FACP 1.3 FORCER DESACTIVER
CONDITION INITIALE REPRISE CARTE DERNIERE
TEMPS INITIAL REPRISE COMPACT
  15 PAS 2*-5/STOCKER 0
  20 PAS 2*-5/STOCKER 0
  40 PAS 2*-5/STOCKER 0
  100 PAS 2*-5/STOCKER 0

RETOU
CONSERVER DONNEES TRANSI 35

;RECHERCHER DONNEES 35
;ASSIGNER 19 TRAN35.TIT BINAIRE
;CONVERSION TRANSITOIRE
;NOM POST1.fdb
;MAILLES
;FICHIER DEPLACEMENTS VITESSES REACTIONS EFFORTS VALEURS
;RETOUR
;CONSERVER DONNEES 1

;-----;;
;-----;;
;   Calcul MECA pour Maillage initiale dans calcul ETM
;-----;;
;-----;;

RECH DONN 611

$GROUPE CREE NOM CPMSUP_P
MAILLE GROUPE $L14$
RETOU
$GROUPE CREE NOM CPMSUP_M
MAILLE GROUPE $L84$
RETOU

$GROUPE CREE NOM CTMINF_T
MAILLE GROUPE $L33$
RETOU
$GROUPE CREE NOM CTMINF_M
MAILLE GROUPE $L88$
RETOU

$GROUPE CREE NOM CPESUP_P

```

MAILLE 6444 6443
 RETOU
 ;MAILLE GROUPE \$L9\$
 ;RETOU

\$GROUPE CREE NOM CPESUP_E
 MAILLE 6383 6382
 RETOU
 ;MAILLE GROUPE \$L251\$
 ;RETOU

\$GROUPE CREE NOM CPEINF_P
 MAILLE GROUPE \$L75\$ \$L74\$
 RETOU
 \$GROUPE CREE NOM CPEINF_E
 MAILLE GROUPE \$C1\$ \$C2\$
 RETOU

\$GROUPE CREE NOM CPPINF_M
 MAILLE GROUPE \$L65\$
 RETOU
 \$GROUPE CREE NOM CPPINF_C
 MAILLE GROUPE \$L38\$
 RETOU

\$GROUPE CREE NOM ELEC
 MAILLE GROUPE \$D11\$ \$D12\$ \$D13\$ \$D14\$
 MAILLE GROUPE \$D15\$ \$D16\$ \$D17\$ \$D18\$ \$D19\$
 RETOU

\$GROUPE CREE NOM MOR
 MAILLE GROUPE \$D43\$ \$D42\$
 RETOU

\$GROUPE CREE NOM PELECH
 MAILLE GROUPE \$D1\$ \$D2\$ \$D3\$ \$D4\$ \$D5\$ \$D6\$ \$D7\$ \$D8\$
 RETOU

\$GROUPE CREE NOM PELECB
 MAILLE GROUPE \$D21\$ \$D22\$ \$D23\$ \$D24\$
 MAILLE GROUPE \$D25\$ \$D26\$ \$D27\$ \$D28\$
 RETOU

\$GROUPE CREE NOM PMO
 MAILLE GROUPE \$D31\$ \$D32\$ \$D33\$ \$D34\$ \$D35\$ \$D36\$
 MAILLE GROUPE \$D37\$ \$D38\$ \$D39\$ \$D40\$ \$D41\$
 RETOU

DEFINITION
 SOUDAGE-CALCUL MECA
 OPTION BIDIM AXISYME THERMO
 REPETER GEOMETRIE
 CARACTERISTIQUES

MAILLE / INTEG 2

;Proprietes Thermio-Mecanique de la TOLE en DP6G
 MAILLE GROUPE \$PMO\$/E -10 NU -11 INTEG 2

;Proprietes Thermique-electriques de l'ELECTRODE en cuivre
 MAILLE GROUPE \$ELEC\$/ E -30 NU -31 INTEG 2
 MAILLE GROUPE \$PELECB\$/ E -30 NU -31 INTEG 2
 MAILLE GROUPE \$PELECH\$/ E -30 NU -31 INTEG 2
 MAILLE GROUPE \$MOR\$/ E -30 NU -31 INTEG 2

LIAISONS

;UX=0 sur l'axe de symétrie
 DROITE PSI 90 PRECISION 0.001 / UX

```

;UY=0 sur le bas de l'electrode
NOEU 3005 / UY
NOEU 3041 / UY

NOEU 2569 / UX UY
NOEU 6690 / UX UY
NOEU 1172 / UX UY
NOEU 6228 / UX UY

CHARGEMENT
1
;Pression sur le de l'electrode
MAILLE GROUPE $L241$/ PY 23.87 FT 850 UNIT

MILIEU
sl2d / CONTA $CPEINF_P$ CIBLE $CPEINF_E$ MODEL 3 --
penal 1.0 epsil 1*-4 GRPE 1
sl2d / CONTA $CPEINF_E$ CIBLE $CPEINF_P$ MODEL 3 --
penal 1.0 epsil 1*-4 GRPE 1

;sl2d / CONTA $$ CIBLE $$ MODEL 3
; penal 1.0 epsil 1*-4 GRPE 1
;sl2d / CONTA $$ CIBLE $$ MODEL 3
; penal 1.0 epsil 1*-4 GRPE 1

TABLE

;MODULE d'YOUNG TOLE
10 / 1 20.0 370000 1000 100000

;COEFFICIENT POISSON TOLE
11 / 1 20 0.29 1000 0.29

;MODULE d'YOUNG Cuivre
30 / 1 20.0 90000 700 40000

;COEFFICIENT POISSON Cuivre
31 / 1 20 0.34 700 0.37

850 / 1 (0 0) (0.02 -1) (0.3 -1) (0.5 -1) (0.52 -1) (100 -1)

RETOUR
CONSERV DONN 2100

ASSI 19 TRAN35.TIT BINA
TEMPERATURE TRANSITOIRE ELECTROKINETIC CARTE
LIBE 19

RECHERCHER DONN 2100
MILIEU

TRANSITOIRE NON LINEAIRE STATIQUE
COMPORTEMENT PLASTIQUE
METHODE OPTIMISEE TEST 2
ALGORITHM ITERATION 40 OPTIM 1
PRECISION ABSOLUE FORCE 2.0 DEPLACEMENTS 1*-5

TEMPS INITIAL 0.
0.00001 /STOCKER 0

RETOUR
CONSERVER DONN TRAN 2100

;#ALLER 20

LIBERER 19
ASSIGNER 19 TRAN2100.TIT
TRANSITOIRE NON LINEAIRE STATIQUE
COMPORTEMENT PLASTIQUE
METHODE OPTIMISEE TEST 2
ALGORITHM ITERATION 40 OPTIM 1

```

PRECISION ABSOLUE FORCE 2.0 DEPLACEMENTS 1*-2
PAS DTMIN 1*-9 DTMAXI 1*-2 FACC 0.5 FACP 1.3
CONDITION INITIALE REPRISE CARTE DERNIERE
TEMPS INITIAL REPRISE
0.1 PAS 1*-5/STOCKER 1
0.2 PAS 5*-5/STOCKER 5
0.3 PAS 5*-5/STOCKER 5
0.4 PAS 5*-5/STOCKER 5
0.5 PAS 5*-5/STOCKER 5
20 PAS 5*-5/STOCKER 10
100 PAS 5*-5/STOCKER 200
RETOUR
CONSERVER DONN TRAN 2100