



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction mécaniques

Présenté par :

AMEUR Khireddine & OUDINA Yakoub

Thème

CARACTERISATION MECANIQUE ET ELECTROCHIMIQUE DE L'ALLIAGE D'ALUMINIUM 2024

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
MAKRI Hocine	MCA	Président
SRIBA Amina	MRB	Encadrante
ZAOUI Moussa	PROF	Co-encadrant
SAIB Cherif	MCA	Examineur

Année Universitaire : 2021 / 2022

N° d'ordre : GM / 2021 / 2022

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous tenons à remercier chaleureusement nos chers parents pour leur travail acharné et leurs prières pour nous.

Nous tenons à remercier tout particulièrement et à témoigner toute notre reconnaissance aux personnes suivantes, pour l'expérience enrichissante et pleine d'intérêt qu'elles nous ont fait vivre durant ce stage :

Mme. Amina SRIBA de nous avoir encadrés et aidés dans la préparation de notre projet de fin d'étude.

Le Directeur du Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI) Riad BADJI d'avoir accepté notre demande de stage au sein du CRTI ainsi que Monsieur Ahmed HADDAD, Directeur de la division de corrosion, protection et durabilité des matériaux.

Messieurs Idir HADJI et Farid CHIBANE chercheurs au CRTI pour leur immense aide dans la compréhension du programme Matlab et le traitement des images par « Ncorr »

Nous remercions également M. Amine BRICK CHAOUICHE chercheur au CRTI de nous avoir fourni le matériau sur lequel nous avons réalisé nos essais expérimentaux

Monsieur Moussa ZAOUI pour ses conseils et ses orientations durant notre projet de fin d'étude

Nous remercions également le professeur, Dr. CHOUKI FARSI, chargé de cours à la Faculté de technologie, pour tous les conseils il nous a prodigués.

DEDICACES

Khair-Eddine Ameur

Je dédie cet humble travail

À ceux qui m'ont soutenu tout au long de mes études, qui ils ont toujours poussé vers le chemin de la connaissance, êtres très chers Dans ce monde, mon père : ma mère et mon père, que Dieu prolonge leur vie.

A mes chers frères et soeurs de ma famille:

Salah El-Din, Adel, Bilal et toutes les filles

À tous les amis et parents fidèles :

Hicham Tayeb Bey, A. Nour Ksimi, Sameh ben Haddad, Sadik Guendouz, Zaki

Richa, A.baki Khezzari, Buthaina Faraj, et cousine Dikra Ameur.

DEDICACES

Odina Yaqoub_

dédie-moi cet humble travail

A celle qui m'a donné amour, tendresse et baume cicatrisant

Ma mère bien-aimée, à qui une bougie brûlait-elle ?

Mon cher père, que Dieu lui fasse miséricorde

A mes chers frères de ma famille :

Brahim, ishak, zakaria, et tous les frères

A tous mes amis qui me connaissent ainsi que mes proches

Qui ont des sentiments d'amour et d'appréciation pour moi :

Madour A.nour, khairo dahdoh, lotfi Oudina, Bakar

Et tout les ami.

Résumé :

Ce travail vise à étudier les propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium (2024), qui contient un faible pourcentage d'éléments ajoutés, et a un grand rôle et avantage dans plusieurs domaines d'application (industrie automobile, aéronautique, et spatiale...etc.).

En fonction de l'essai de traction parmi les essais destructifs, et en appliquant cet essai à un groupe d'échantillons sous forme d'éprouvettes plates, les propriétés mécaniques de cet alliage (Module d'Young, résistance mécanique et limite d'élasticité...etc.) ont été obtenues.

Nous avons eu la possibilité également de mener des essais de traction combinés à la corrélation d'image numérique (DIC). Cette technique a le grand avantage de compléter la compréhension de la déformation du matériau à l'aide des images montrant la distribution du champ de déformation le long de la zone étudié.

De plus, certains échantillons ont été soumis à l'effet de corrosion d'une solution de NaCl, et nous avons recueilli tous les résultats pour chaque échantillon.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة الخصائص الميكانيكية لسبائك الألمنيوم (2024) والتي لها دور كبير وميزة في العديد من مجالات التطبيق (صناعة السيارات والطيران والفضاء، إلخ)

اعتمادًا على اختبار الشد ضمن الاختبارات التدميرية، وتطبيق هذا الاختبار على مجموعة من العينات على شكل عينات مسطحة، تم الحصول على الخواص الميكانيكية لهذه السبيكة (معامل يونغ، المقاومة الميكانيكية وحد المرونة ... إلخ)

كما أتاحت لنا الفرصة لإجراء اختبارات الشد بمساعدة ارتباط الصورة الرقمية

تتميز هذه التقنية بميزة كبيرة تتمثل في استكمال فهم تشوه المادة باستخدام الصور التي توضح توزيع مجال التشوه على طول المنطقة المدروسة

بالإضافة إلى ذلك، تعرضت بعض العينات لتأثير التآكل لمحلول ملحي

، وقمنا بجمع جميع النتائج لكل عينة

Abstract

This work aims at studying the mechanical properties of aluminum alloy (2024), which has a great role and advantage in several fields of application (automotive, aeronautical, and space industries, etc.).

Depending on the tensile test among the destructive tests, and applying this test to a group of samples in the form of flat specimens, the mechanical properties of this alloy (Young's Modulus, mechanical resistance and elastic limit ...etc.) have been obtained.

We also had the opportunity to conduct tensile tests aided with digital image correlation (DIC). DIC technique has the great advantage of completing the understanding of the deformation of the material using images showing the distribution of the deformation field along the studied area.

In addition, some samples were subjected to the corrosion effect of NaCl solution, and we collected all the results for each sample.

Sommaire

Introduction	1
--------------------	---

Chapitre I: Généralités sur l'aluminium et ses alliages

1. L'aluminium et ses propriétés	2
1.1. Propriétés mécaniques	2
1.2. Propriétés physiques	3
1.3. Propriétés chimiques.....	4
2. Alliages d'aluminium	4
2.1. Aluminium non allié	4
2.2. Aluminium industriel : ($Al \geq 99,00\%$)	4
2.2.1. Influence des impuretés	4
2.2.2. Résistance à la corrosion.....	5
2.2.3. Propriétés mécaniques	5
3. Désignation des alliages d'aluminium.....	7
4. Domaine d'applications de l'aluminium et ses alliages	8
4.1. Domaine de transport.....	8
4.2. Domaine de l'énergie électrique.....	8
4.3. Domaine d'alimentation	8
5. Alliage D'aluminium Série 2000 (Al-Cu Et Al-Cu-Mg).....	8
5.1. Alliage Aluminium 2024	9
5.1.1. Composition chimique	9
5.1.2. Caractéristiques mécaniques	9
5.1.3. Résistance à la corrosion	10
6. Traitements thermiques des alliages de la série 2000	10
6.1. Buts et rôle des traitements thermiques	10
6.2 Les types de traitements thermiques qui peuvent être Appliqués aux alliages d'aluminium.....	11

6.2.1. Traitements d'homogénéisation	11
6.2.2. Traitements D'adoucissement	11
6.2.3. Traitements de durcissement structural	12
Références Bibliographiques.....	16

Chapitre II: Corrélation d'image numérique : principe et application

1. Terminologie de la DIC.....	19
2. Principe de DIC	20
3. Application de la DIC combinée à l'essai de traction	22
3.1. Préparation de la surface de l'éprouvette pour l'essai de Traction-DIC.....	23
3.1.1. Essai de traction.....	25
3.1.2. Courbes de traction.....	26
3.2. Programme utilisé pour traitement d'image de DIC.....	27
3.3. Résultats DIC	33
3.3.1. Les résultats d'éprouvette numéros (1)	33
3.3.2. Les résultats d'éprouvette numéros (2)	37
Références Bibliographiques.....	42

Chapitre III: Corrosion de l'aluminium et ses alliages

1. Diagrammes d'équilibre électrochimique de Pourbaix	42
2. Diagramme E-pH de l'aluminium	42
3. Formes de corrosion d'aluminium.....	43
3.1. Corrosion uniforme.....	43
3.2. Corrosion par piqûres	44
3.2.1. Généralités	44
3.2.2. Phénomène pour l'aluminium	44
3.2.3. Corrosion galvanique.....	46
3.2.4. Corrosion caverneuse	47
3.2.5. Corrosion inter granulaire.....	47

4. Influence des éléments d'alliages sur la corrosion de l'aluminium	48
5. Procédure expérimentale	51
5.1. Matériaux	51
5.2. Test de polarisation	51
5.2.1. Description et principe de fonctionnement de l'appareillage.....	51
5.2.2. Techniques de caractérisation électrochimiques	52
Références bibliographiques	56
Conclusion.....	58

Liste des figure

Chapitre I: Généralités sur l'aluminium et ses alliages

Figure I.1 : Evolution des propriétés mécaniques en fonction de l'écrouissage.....	6
Figure I.2 : Les trois domaines de recristallisation selon la taille des grains	6
Figure I.3 : Evolution des propriétés mécaniques en fonction du temps de recuit	7
Figure I.4 : Schéma représentatif du traitement thermique de durcissement par précipitation pour les alliages d'aluminium 2xxx.....	13

Chapitre II: Corrélation d'image numérique : principe et application

Figure II.1 : Schéma d'un montage de corrélation d'images numériques bidimensionnel....	18
Figure II.2 : Montage expérimental de corrélation d'images numériques bidimensionnel : Essai Traction-DIC.....	19
Figure II.3 : solution au niveau du pixel (p) et ses voisins.....	20
Figure II.4 : Machine de traction (MTS Criterion TM model C45.105).....	22
Figure II.5 : Dimensions de l'éprouvette de traction.....	23
Figure II.6 : Epreuve de fatigue usinées et polies.....	24
Figure II.7 : Processus de revêtement.....	24
Figure II.8 : Epreuve à moucheté.....	24
Figure II.9 : La fin d'opération de moucheté.....	24
Figure II.10 : Epreuve déformé après essai de traction.....	25
Figure II.11 : Courbes de traction de l'aluminium 2024.....	26
Figure II.12 : logiciel de Bulk Rename Utility.....	28
Figure II.13 : programme Image J.....	28
Figure II.14 : La partie étudiée.....	28
Figure II.15 : La fin du traitement de la pièce étudiée.....	29
Figure II.16 : Programme MATLAB.....	29
Figure II.17 : Ouvrir la fenetre Ncorr.....	30
Figure II.18 : La dernière opération à Ncorr et c'est un résultat.....	32

Figure II.19 : Éprouvette (01) après la rupture	36
Figure II.20 : Éprouvette (02) après la rupture.....	40

Chapitre III : Corrosion de l'aluminium et ses alliages

Figure III.1 : Diagramme de Pourbaix E – pH de l'aluminium	43
Figure III.2 : Mécanisme de la corrosion par piqûres de l'aluminium	44
Figure III.3 : Coupe d'une piqûre sur un alliage d'aluminium type 2000, microscope optique, grossissement $\times 200$)	45
Figure III.4 : Aspects de surface d'un alliage d'aluminium avec des piqûres	46
Figure III.5 : Exemple caractéristique d'une corrosion d'un alliage d'aluminium par un couplage galvanique avec un acier inoxydable (une vis)	47
Figure III.6 : Effet des éléments d'addition sur la résistance à la corrosion et à la fatigue des alliages d'aluminium	48
Figure III.7 : Evolution du potentiel de corrosion de l'aluminium en fonction de l'enrichissement en éléments d'addition.....	50
Figure III.8 : Dispositif expérimental des tests de polarisation	52
Figure III.9 : Courbes de polarisation obtenues à différents taux de déformation de l'alliage d'aluminium 2024	54

Liste de tableau

Chapitre I: Généralités sur l'aluminium et ses alliages

Tableau I.1 : Propriétés physiques de l'aluminium	3
Tableau I.2 : Désignation des séries principales des alliages d'Aluminium	7
Tableau I.3 : Composition chimique de l'alliage d'aluminium 2024	9
Tableau I.4 : Caractéristiques mécaniques de l'aluminium 2024	9
Tableau I.5 : Désignation des différents traitements thermomécaniques correspondant à l'état T	15

Chapitre II: Corrélation d'image numérique : principe et application

Tableau II.1 : Grandeurs Caractéristiques de l'aluminium 2024	27
--	----

Chapitre III : Corrosion de l'aluminium et ses alliages

Tableau III.1 : Classement des alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la corrosion formes de corrosion généralement observées dans ces alliages	49
Tableau III.2 : Potentiel de corrosion de quelques particules intermétalliques	50
Tableau III.3 : Composition chimique de l'alliages d'aluminium 2024.....	51
Tableau III.4 : Paramètres électrochimiques de l'alliage d'aluminium 2024	55



Introduction

La corrélation d'images numériques (*Digital Image Corrélation (DIC)*) est largement utilisée dans la recherche et l'industrie. Cette technique permet la mesure des champs de déplacement, et de déformation, complets de la surface d'une pièce au cours de sa transformation lors d'un essai mécanique. La corrélation d'images présente de nombreux avantages : mesure sans contact, mesure d'un champ complet, une bonne précision, une bonne résolution et elle ne nécessite pas un montage expérimental complexe ni coûteux. Cette méthode ne nécessite que l'utilisation d'un appareil photo numérique, d'un objectif, d'un système d'éclairage et d'un algorithme de corrélation. La qualité des différents éléments de ce système ont un impact significatif sur la précision de mesure de la méthode. La DIC est utilisée dans un très grand nombre d'applications. Commencant par la DIC 2D, elle permet les mesures classiques de déplacement en statique, mais également à haute vitesse, à haute température, la caractérisation de matériaux et la détection et mesure de fissures. La DIC 3D est une méthode de corrélation d'images volumique qui permet, sur des images de tomographie, de réaliser des mesures de déplacements en 3D. Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive des applications possibles de la DIC, mais ces différents exemples montrent l'intérêt et la flexibilité de cette méthode dans le domaine des mesures sans contact.

Dans le cadre de la préparation de notre projet de fin d'étude, nous avons eu la possibilité de travailler avec la méthode de corrélation d'image numérique. L'application de cette technique dans notre travail a été réalisée en couplage avec l'essai de traction de l'alliage de l'aluminium 2024. L'essai a été effectué sur des éprouvettes plates en variant la vitesse de déformation.

La deuxième partie dans notre travail expérimental a concerné la détermination de la vitesse de corrosion de l'alliage d'aluminium en fonction de son taux de déformation.

Chapitre I

Généralités sur l'aluminium et ses alliages



Dans ce chapitre, nous rappelons quelques notions générales sur l'aluminium et ses alliages, ainsi nous avons fait des recherches bibliographiques sur les propriétés mécaniques, physiques et les traitements thermiques d'aluminium et ses alliages.

L'aluminium est un métal blanc tirant légèrement sur le bleu, il est présent en grande quantité dans la croûte terrestre, avec une masse de minerai représentant 8% de la masse de cette dernière. Il vient au second rang des métaux les plus employés après l'acier. Il est léger, robuste, facile à usiner et économique. Techniquement, l'aluminium est un métal pur (faiblement allié), sa structure est de type cubique à faces centrées [1-3].

A cause de propriétés mécaniques, physiques et chimiques, remarquables du métal et de la variété de ses alliages, l'aluminium est utilisé dans de nombreux secteurs technologiques comme l'industrie des véhicules, des machines, des médicaments et des outils industriel et médicale, etc.

Grâce à des additions d'éléments d'alliage tels que le cuivre, le manganèse, le magnésium, le zinc, etc. et grâce à des gammes de transformation adaptées à l'aluminium, les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques peuvent varier dans une vaste étendue au point qu'on dispose littéralement d'alliages d'aluminium pour des multitudes d'applications.

1. L'aluminium et ses propriétés

1.1. Propriétés mécaniques

L'aluminium commercialement pur dans l'état recuit a une faible propriété mécanique Mais peut grandement améliorer ces propriétés par écrouissage, par addition d'éléments D'alliage ou Par traitements thermiques, selon les cas. Ainsi, il apparaît à l'état recuit une Excellente ductilité Par rapport aux aciers. L'aluminium est un matériau relativement Élastique mais peu malléable.

La résistance mécanique et la résistance à la fatigue de l'aluminium sont tout aussi différentes de celles de l'acier. C'est pourquoi il est important de bien connaître les limites du matériau avant de l'utilise. Contrairement à l'acier, la soudure de l'aluminium peut présenter certaines difficultés, Il faut retenir ce paradoxe : « Plus on soude l'aluminium, plus on l'affaibli». Cette Situation se produit en raison d'un changement des propriétés métallurgiques de l'aluminium de base dans la zone thermiquement affectée (ZAT). [4].



Compte tenu de sa structure cristalline (CFC), l'aluminium pur est très déformable à froid ou à chaud, de ce fait, il, est très ductile, ce qui facilite son usinage et sa mise en forme, de ce fait, il, est très malléable (allongement de rupture 30 à 40%), il est peu tenace. Résistance à la rupture par traction $R=70$ à 100 N/mm² et il est de faible dureté. [4, 5].

- **Module d'élasticité** : Il est à 66.6 GPa pour l'aluminium pur et augmentes-en présence d'impuretés et d'additions. Pour les alliages, le module est compris entre 69 et 72 GPa et particulièrement sensible à la teneur en silicium 70 à 82 GPa lorsque la teneur en silicium varie de 2 à 18%.
- **Module de torsion (cisaillement)** : il est égal à 25 GPa pour l'aluminium pur titré à 99.9% et 26 GPa pour l'aluminium commercial.

1.2. Propriétés physiques

L'aluminium est un élément du 3eme groupe de la classification de Mendeleïev, dont le nombre atomique est 13 et la masse atomique $M=26.98$. Sa température de fusion est 660 °C et celle d'ébullition 2467 °C environ, il possède un réseau cubique à face centré (CFC) à équidistance $a = 4.0412$ Å.

Sa caractéristique la plus importante est sa faible densité 2.7 g/cm³ à température ambiante. Cette densité ne varie pas de façon sensible dans les alliages légers, elle reste toujours inférieure à 2 g/cm³. Sa conductibilité thermique est de 0.57 cal/cm.s.C° et sa conductibilité électrique est élevée (2.6548 ohm. mm² /m). [4, 5, 6]

Les propriétés physiques de l'aluminium non allié sont résumées dans tableau I.1 :

Propriété	Unité	Valeur
Paramètre de maille (à 298.15°K)	Å	4.05
Point de fusion	°C	660.45
Point d'ébullition	°C	2056
Pression de vapeur	Pa	0.0037
Energie interne massique	J kg ⁻¹	398000
Capacité thermique massique C_P (à 298.15°K)	J kg ⁻¹ K ⁻¹	897
Conductivité thermique (à 298.15°K)	W m ⁻¹ K ⁻¹	237
Résistivité électrique (à 298.15°K)	10 ⁻⁹ m	26.548

Tableau I.1: Propriétés physiques de l'aluminium.



1.3. Propriétés chimiques

L'aluminium se distingue par sa résistance élevée à la corrosion du fait de la formation à la surface d'une couche protectrice (Al_2O_3). La pureté du métal améliore sa résistance à la corrosion par les solutions salines et l'eau de mer ainsi que le brouillard aussi pour l'industrie chimique et agroalimentaire qui emploie un aluminium titrant au moins 99.5%. La plus parts des acides minéraux (chlorhydriques, sulfurique) qu'organiques (trichloracétique) ainsi que la soude et la potasse attaquent l'aluminium. [7, 8]

2. Alliages d'aluminium

2.1. Aluminium non allié [9]

Les propriétés physiques se résument de la manière suivante :

- Numéro atomique $Z = 13$,
- Masse atomique $M = 26.97$.
- Point de fusion : $600\text{ }^\circ\text{C}$
- Structure cristalline : CFC ($a = 0,404\text{ nm}$ à 20°C)
- Masse volumique à $20\text{ }^\circ\text{C}$: 2700 Kg.m^{-3}
- Coefficient de dilatation :
 $\alpha = 23,8 \cdot 10^{-6}$
K⁻¹ (de $20\text{ }^\circ\text{C}$ à $100\text{ }^\circ\text{C}$) ;
 $\alpha = 25,4 \cdot 10^{-6}$
K⁻¹ (de $20\text{ }^\circ\text{C}$ à $300\text{ }^\circ\text{C}$) ;
 $\alpha = 28,7 \cdot 10^{-6}$ K⁻¹ (de $20\text{ }^\circ\text{C}$ à $600\text{ }^\circ\text{C}$) ;
- Capacité thermique massique à $20\text{ }^\circ\text{C}$: $c = 950\text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Conductivité thermique à $20\text{ }^\circ\text{C}$: $\lambda = 217,6\text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Résistivité électrique à $20\text{ }^\circ\text{C}$: $\rho = 2,63\text{ }\mu\Omega.\text{cm}$

La conductivité électrique de l'aluminium est égale à 65 % de celle du cuivre

2.2. Aluminium industriel : ($Al \geq 99,00\%$)

2.2.1. Influence des impuretés

L'aluminium industriel contient généralement 0,5 % d'impuretés (Principalement Fe + Si), mais il peut être obtenu presque pur par raffinage électrolytique ($Al \geq 99,99\%$).

Ces impuretés ont des effets différents sur :

- La conductivité électrique : elle diminue avec toutes les additions ou impuretés



➤ D'autres paramètres comme :

Ti (0,05 à 0,10 %) et B (0,005 à 0,01 %) qui affinent le grain lors de la solidification, Zr (inférieur à 0,2 %) qui inhibe le grossissement du grain, Si (0,5 à 0,8 %) qui abaisse la tenue à la fissuration à chaud mais augmente la tenue au fluage, Ni et Fe qui augmentent la tenue mécanique à chaud. La somme de (Cu + Ni + Sn + Pb) doit être inférieure à 0,1 % pour augmenter la résistance à la corrosion.

2.2.2. Résistance à la corrosion

L'aluminium est fortement oxydable, mais il se recouvre d'une pellicule d'oxyde (Al_2O_3) épaisse, adhérente, qui protège le métal, appelée alumine. Celle-ci n'a qu'une résistance chimique limitée mais résiste cependant bien dans des solutions d'acide chlorhydrique, sulfurique et nitrique. En revanche, les bases attaquent violemment le métal. Cette protection peut être améliorée par anodisation : il s'agit d'un traitement permettant d'obtenir une couche d' Al_2O_3 épaisse mais poreuse, qui ensuite colmatée par un traitement à l'eau chaude. Cette anodisation a également un but décoratif, car il est impossible d'utiliser des colorants spéciaux avant le colmatage.

2.2.3. Propriétés mécaniques

Les propriétés de l'aluminium non allié recuit sont très limitées. Ainsi pour l'aluminium à 99,5 % : $R_{p0,2} = 10-20 \text{ MPa}$; $R_m = 70-80 \text{ MPa}$; $A \% = 50-60$; $E = 65000 - 70000 \text{ MPa}$, on a $\nu = 0,36$

La limite élastique de l'aluminium est quasi nulle. Concernant les propriétés mécaniques, elles sont fortement modifiées par la déformation plastique à température proche de l'ambiante. La Figure I.1 montre l'évolution des propriétés mécaniques en fonction de l'écroutissage.

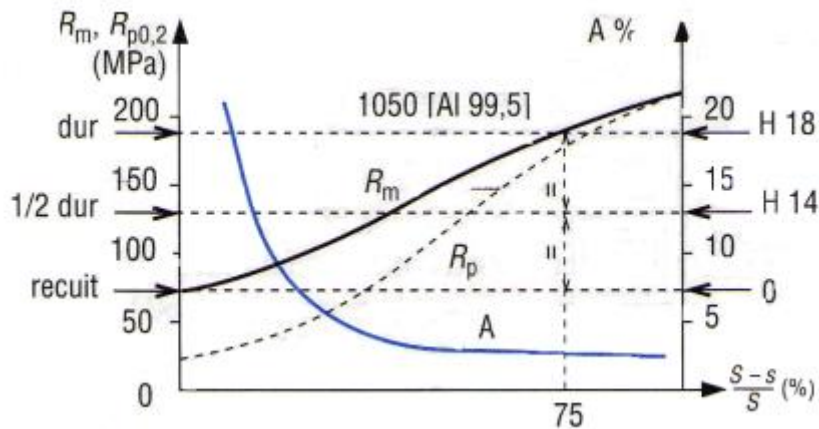


Figure I.1: Evolution des propriétés mécaniques en fonction de l'érouissage. [4]

Après érouissage, le chauffage entraîne des phénomènes de restauration étudiés : recristallisation, mais dans le cas de l'aluminium, ces processus se produisent à des températures basses qui peuvent être proches de l'ambiante pour les nuances les plus pures. Le phénomène de recristallisation est donc important pour l'aluminium. Les figures I.2 et I.3 montrent, en fonction de la température de recuit, l'évolution de la taille du grain (fonction du taux d'érouissage) et l'évolution des propriétés mécaniques pour Al = 99,5 %.

La figure I.2 montre les trois domaines de recristallisation selon la taille des grains.

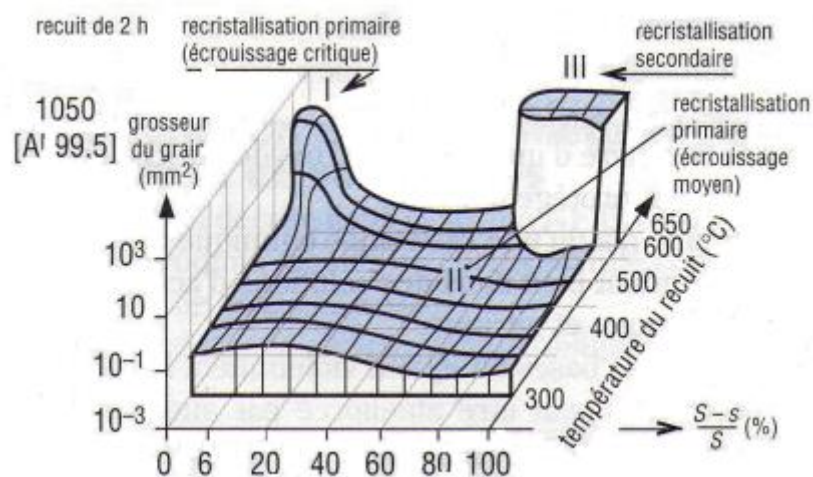


Figure I.2: Les trois domaines de recristallisation selon la taille des grains [9].



La figure I.3 montre Les trois domaines de recristallisation selon la taille des grains ;

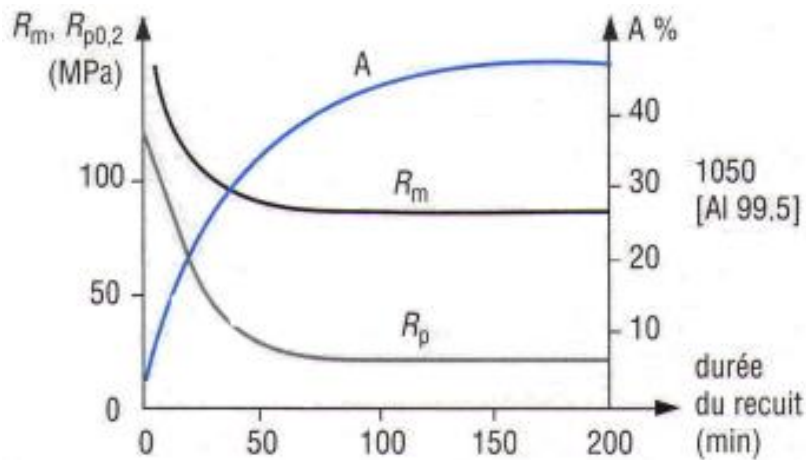


Figure I.3: Evolution des propriétés mécaniques en fonction du temps de recuit. [9]

3. Désignation des alliages d'aluminium

La désignation des alliages d'aluminium s'effectue suivant un système de 4 chiffres. Le premier chiffre de la série indique le principal élément alliant en présence et les chiffres subséquents indiquent la composition (voir tableau I.2). On désignera les alliages d'aluminium corroyés suivant les normes de l'association d'aluminium. Ces normes affectent à chaque type d'alliage un nombre de quatre chiffres qui permet de les classer en séries ;

Série	Désignation	Éléments d'alliage	Phase majoritaire
1000	1XXX	99% d'Aluminium	-
2000	2XXX	Cuivre (Cu)	Al ₂ Cu, Al ₂ Cu/Mg
3000	3XXX	Manganèse (Mn)	Al ₆ Mn
4000	4XXX	Silicium (Si)	-
5000	5XXX	Magnésium (Mg)	Al ₃ Mg ₂
6000	6XXX	Magnésium (Mg) Silicium (Si)	Mg ₂ Si
7000	7XXX	Zinc (Zn)	MgZn ₂
8000	8XXX	Autres éléments	-
9000	9XXX	Non utilisé	-

Tableau I.2 : Désignation des séries principales des alliages d'Aluminium.



4. Domaine d'applications de l'aluminium et ses alliages

4.1. Domaine de transport

En raison de sa légèreté, l'aluminium et ses alliages peut être utilisé dans le domaine de transport, dans le sens de la construction des automobiles, des véhicules ferroviaires (les trains, les tramways, les métros), ainsi que l'aéronautique (les avions). Car il réduit les émissions de carburant et le bruit, les vibrations et la résistance à la corrosion de la consommation, et absorbe aussi le choc de l'accident, l'aluminium ne rouille pas dans la petite voiture, le poids de la structure de l'aluminium peut être jusqu'à 45 % inférieurs à la structure en acier, et aujourd'hui, 50 % des moteurs hors-bords sont fait d'aluminium. Une coque en aluminium peut tenir plus de 30 ans sans donner le moindre signe de Fatigue.

4.2. Domaine de l'énergie électrique

Les lignes aériennes et des câbles d'alimentation de la distribution et la transmission de l'énergie électrique, des câbles électriques à usage industriel. L'aluminium est particulièrement bien adapté à cet usage en raison de sa conductivité électrique élevée, une densité et une bonne résistance à la corrosion de base [10].

4.3. Domaine d'alimentation

L'aluminium a un grand champ d'utilisation dans le domaine de l'alimentation, par exemple il est utilisé dans la construction des boîtes de conservation, les papiers aluminium, canettes, barquettes, ustensiles de cuisine. Cependant, l'aluminium en cas d'ingestion importante peut parfois avoir des effets néfastes pour le système nerveux. Il a été reporté que des personnes ont développé une encéphalopathie (forme de démence)

5. Alliage D'aluminium Série 2000 (Al-Cu Et Al-Cu-Mg)

Les teneurs en cuivre des alliages de cette série sont comprises entre 2,6 et 6,3 % Les teneurs en magnésium varient de 0,5 à 1,5 %. Le durcissement structural de ces alliages est dû à la précipitation de composés transitoires d' Al_2Cu et $Al_2Cu Mg$. Ces phases leur confèrent d'excellentes propriétés mécaniques. L'addition de silicium et de manganèse, favorise la formation de composés quaternaires. Par dispersion, ces derniers améliorent les propriétés de la matrice [11].

Les éléments Mn, Fe et Si sont considérés comme des impuretés dans l'alliage. La présence de fer conduit à la formation de Cu_2Fe_7Al , contenant le fer, diminue la quantité de



civre nécessaire au durcissement structural. Cependant, si, en plus du fer, on ajoute du nickel, il ya formation du composé Al_9FeNi , qui confère à l'alliage une bonne tenue mécanique jusqu'à $230^{\circ}C$.

5.1. Alliage Aluminium 2024

5.1.1. Composition chimique

Al	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Zn	%Cr	%Ti+Zi	%Mg	%Other
2024	0.5	0.5	3.8-4.8	0.3-0.9	0.25	0.1	0.15	1.2-1.8	0.15

Tableau I.3: Composition chimique de l'alliage d'aluminium 2024.

5.1.2. Caractéristiques mécaniques

L'aluminium pure, à l'état recuit, possède des propriétés mécaniques faibles, on peut toutefois améliorer considérablement ces propriétés par écrouissage, traitements thermique sou addition d'éléments d'alliages, Puisque l'aluminium et ses alliages ont une structure cubique à faces centrées, ils font preuve à l'état recuit, d'une excellente ductilité, et ce à toute température. La résistance mécanique, l'allongement et le module d'élasticité évoluent favorablement lorsqu'on abaisse la température jusqu'au voisinage du zéro absolu. Aucun alliage d'aluminium ne devient fragile aux basses températures. On a cité dans cette tableau les déférentes propriétés de l'alliage 2024.

Résistance	Limite d'élasticité à 0,2 %	Allongement sur 5d	Dureté	Résistance à la fatigue	module de Young E
>420 MPA	> 260 MPA	> 8 %	>140 HV	400---360MPA	65—70 GPa

Tableau I.4: Caractéristiques mécaniques de l'aluminium 2024.



5.1.3. Résistance à la corrosion

L'aluminium montre une bonne résistance à la corrosion grâce à la formation de la couche protectrice d'oxyde Al_2O_3 et elle peut être améliorée (couche épaisse) par anodisation. Les alliages d'aluminium présentent une bonne résistance à la corrosion par piqûres. Par contre, ils sont sensibles à la corrosion galvanique ce qui nécessite des précautions à prendre en particulier en présence du fer. Il est à signaler que des risques de corrosion inter granulaire et de corrosion sous tension existent dans les alliages des séries 2000.

6. Traitements thermiques des alliages de la série 2000

Les traitements thermiques n'ont pas comme seul but d'agir sur le niveau de résistance mécanique. Ils sont susceptibles d'influencer un grand nombre d'autres propriétés parfois très importantes pour l'industrie telles que l'aptitude à la transformation à chaud ou à froid, la résistance à la corrosion, la résistance à la fatigue et au fluage, l'aptitude à l'oxydation anodique, la conductivité électrique ou bien encore la stabilité dimensionnelle.

6.1. Buts et rôle des traitements thermiques

Les traitements thermiques permettent une modification de toutes les propriétés des matériaux, car celles-ci sont toutes étroitement liées à leur structure : propriétés mécaniques, propriétés chimiques et de résistance à la corrosion, propriétés physiques diverses (électriques, magnétiques, etc.). On commence à bien comprendre les relations entre structure et propriétés, et, comme on peut maîtriser les évolutions structurales par traitement thermique, il est souvent possible d'obtenir ainsi les propriétés voulues. Il s'agit, bien entendu, d'améliorer les propriétés des matériaux pour leur emploi mais, souvent, l'amélioration de l'une d'elles va généralement de pair avec une dégradation d'autres propriétés. Ainsi, une augmentation de dureté ou de résistance mécanique est toujours associée à un accroissement de la fragilité ou à une diminution de la ductilité, et à l'altération de nombreuses autres propriétés, mais aussi à une diminution de l'usinabilité ou à une impossibilité d'emploi du matériau traité thermiquement pour le soudage par exemple. De même, un recuit permet en généra d'augmenter la malléabilité et la facilité de mise en forme, mais diminue la dureté, la résistance mécanique et la résistance à l'usure, l'usinabilité pouvant être, selon le cas, améliorée ou diminuée.



6.2 Les types de traitements thermiques qui peuvent être Appliqués aux alliages d'aluminium

Les trois types de traitements thermiques qui peuvent être appliqués aux alliages d'aluminium sont :

- Les traitements d'homogénéisation
- Les traitements d'adoucissement
- Les traitements de trempe structurale

Ces traitements font l'objet des paragraphes suivants

6.2.1. Traitements d'homogénéisation

A l'heure actuelle, les traitements d'homogénéisation sont extrêmement répandus et tendent à se généraliser à la fois dans le cas des alliages d'aluminium et dans le cas de l'aluminium non allié [12]

Les traitements d'homogénéisation consistent à maintenir les plaques ou billettes coulées, à une température assez élevée (entre 450 et 610 °C) et pour un temps prolongé (durant 6 à 48 h) dans le but de faciliter leur transformation ou d'améliorer les propriétés des produits obtenus.

Les effets du traitement d'homogénéisation, qui peuvent être retenus sont :

- La dissolution de phases intermétalliques en excès
- le nivellement des concentrations dans la solution solide
- la coalescence de phases intermétalliques déjà présentées et la précipitation de nouvelles phases.

La redistribution du cuivre est assez bonne pour les alliages Al-Cu.

6.2.2. Traitements D'adoucissement

Les traitements d'adoucissement par recuit ou par restauration sont appliqués en cours ou en fin de transformation par déformation plastique [13]. Le but d'un traitement d'adoucissement est d'améliorer ou de régénérer la plasticité d'un alliage. Le traitement de restauration s'effectue à une température inférieure à celle du seuil de recristallisation ; il correspond à un perfectionnement du réseau d'un métal écroui, qui se réalise soit par restauration de la structure, soit par recristallisation, soit par grossissement de grain, soit par



transformation de phase. Par un traitement d'adoucissement par restauration, le risque de recristallisation grossière est éliminé. Le traitement de recuit consiste à porter en température l'alliage pour une durée déterminée suivi d'un refroidissement contrôlé après avoir atteint les caractéristiques désirées. Le couple durée-température choisi est spécifique pour chaque type d'alliage et dépend du niveau d'écrouissage du matériau [14].

6.2.3 Traitements de durcissement structural

Le phénomène de « durcissement structural », a été découvert en 1906 par Wilm [15] qui mitent évidence une évolution de la dureté de certains alliages d'aluminium après maintien à la température ambiante suite à une mise en solution et une trempe fraîche. Le durcissement structural est basé en effet sur la précipitation des éléments soluté due à la diminution de leur solubilité à la température ambiante [16]. Le processus de durcissement nécessite donc trois conditions :

- Les éléments d'alliage doivent être solubles dans l'aluminium et leur solubilité doit diminuer avec la baisse de la température.
- après trempe fraîche, la solution solide sursaturée (α SS) doit apparaître.
- des précipités durcissant se forment pendant le traitement thermique de revenu.

Seuls les alliages des séries 2xxx, 4xxx, 6xxx et 7xxx sont sujets au traitement de durcissement structural.

Le traitement thermique comporte trois étapes principales :

- une mise en solution solide ;
- un refroidissement rapide ;
- un maintien soit à la température ambiante, appelé « maturation », soit à une température élevée, dit « revenu ».

Celles-ci sont précisées dans les paragraphes suivants [14].

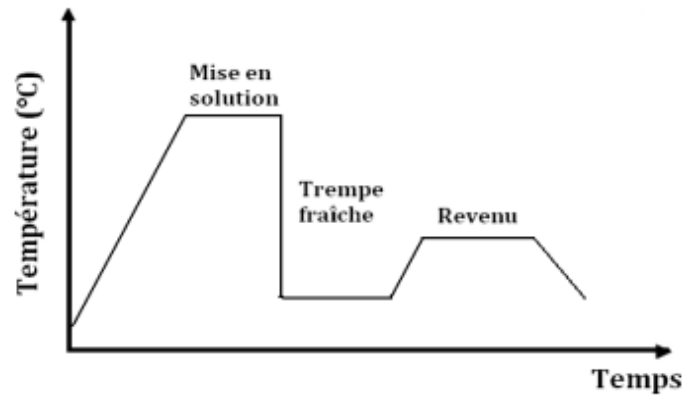


Figure I.4: Schéma représentatif du traitement thermique de durcissement par précipitation pour les alliages d'aluminium 2xxx.

7.2.3.1 La Mise en solution

Consiste à un chauffage à une température supérieure à la température de "solvus" pendant une durée suffisante pour atteindre un équilibre thermique afin que tous les atomes de soluté se retrouvent en solution solide. La température de mise en solution est comprise, en général, entre 400 et 600 °C ; la température optimale dépend surtout de la composition chimique de l'alliage bien évidemment. La durée de mise en solution est également très importante ; elles se retrouvent en solution solide. La température de mise en solution est comprise, en général, entre 400 et 600 °C ; la température optimale dépend surtout de la composition chimique de l'alliage bien évidemment. La durée de mise en solution est également très importante ; elle doit être suffisante pour mettre en solution solide le plus grand nombre possible d'intermétalliques sans toutefois être trop longue.

6.2.3.2 La Trempe

C'est l'opération de refroidissement suffisamment rapide après l'étape de mise en solution de manière à garder la solution solide sursaturée à la température ambiante. Le refroidissement doit, en effet, être effectué le plus rapidement possible pour éviter la décomposition de la solution solide dans toute la pièce. Après la trempe, à la température ambiante, une solution solide sursaturée en atomes de soluté en substitution et en lacunes est donc obtenue. La trempe influe sur les caractéristiques mécaniques et sur la sensibilité à la corrosion de l'alliage. Une vitesse de trempe inférieure à 200 °C/min sensibilise l'alliage à la corrosion inter granulaire et diminue sa résistance mécanique.



Le refroidissement par trempe peut prendre plusieurs formes : la trempe par immersion dans l'eau, par aspersion ou à l'air soufflé.

6.2.3.3. La Maturation intervient après l'étape de trempe

Après l'étape de refroidissement la solution solide se trouve dans un état métastable ; elle a donc tendance à retrouver son état d'équilibre. De manière progressive et spontanée, la solution solide se décompose à température ambiante. Ce phénomène est fondamental pour le durcissement structural des alliages 2xxx : au cours de ce processus, une augmentation des propriétés mécaniques en fonction du temps de maturation est observée. Cette maturation est qualifiée de naturelle ; elle peut aussi être effectuée dans l'eau chaude favorisant la précipitation, mais plus particulièrement le colmatage de l'alumine formée par anodisation.

6.2.3.4. Le Revenu

Peut le plus souvent être préféré à une maturation moins durcissant. Le retour de la solution solide sursaturée à l'état d'équilibre peut être accéléré par des maintiens à une température supérieure. Le revenu est donc l'étape de chauffage ultérieure à des températures inférieures aux températures de mise en solution ; elles sont de l'ordre de 100 à 200 ° C. Le résultat de cette précipitation sous l'effet du revenu est une augmentation des propriétés mécaniques telle que la dureté. Les conditions de revenu telles que la température et la durée sont spécifiques à chaque type d'alliage.

Dans le Tableau I sont présentés les symboles des différents traitements pour l'état durci par traitement thermique (T) qui est l'état naturel des alliages à durcissement structural et le plus utilisé dans l'industrie [14].



Symbole	Traitement thermique
T1	Refroidissement contrôlé après démoulage et maturation naturelle
T3	Mise en solution, trempe, écrouissage contrôlé et maturation Naturelle
T4	Mise en solution, trempe et maturation naturelle
T5	Refroidissement contrôlé après démoulage et revenu ou sur-revenu
T6	Mise en solution, trempe et revenu au pic
9+T7	Mise en solution, trempe et sur-revenu (stabilisation)
T8	Mise en solution, trempe, écroui et revenu

Tableau I.5: Désignation des différents traitements thermomécaniques correspondant à l'état T.



Références Bibliographiques

- [1] jm. dorlotjp. bailon j. masounave. *des matériaux. montréal*, éditions de l'école polytechnique de montréal, 1986.
- [2] rogerdevelay, données numériques sur les alliages d'aluminium de transformation, forme. m 445 – 1 technique de l'ingénieur
- [3] vargel, christian. corrosion de l'aluminium, paris, dunod, 1999, 502 p.
- [4] jean barralis et gérardmeader pièces – métallurgie élaboration, structure ; propriété, normalisation, afnor nathan paris 2001.
- [5] jean bailon et j.m.dorlotd es matériaux 3eme édition, école polytechnique de montréal, 2000.
- [6] fancy et pompidou, précis de fonderie : méthodologie, production et normalisation ; afnor 2eme édition 1992.
- [7] g.FANCY et POMPIDOU, Précis de fonderie : méthodologie, production et normalisation ; AFNOR 2eme édition 1992.
- [8] jean philiber, alain vignes, yvesbrechet, métallurgie du mènèrai aux matériaux editionmosson, paris 1998.
- [9] précis de métallurgie (élaboration, structures-propriétés, normalisation) par j.barralis&j.maeder.afnor.editionnathan.septembre 2004
- [10] module 16
- [11] r. p. reed et al., nbs special publication 647-1, washington, 1983.
- [12]a. guedri « conception et simulation numérique des caractéristiques mécanique des
- [13]mémoire de master, djabrikhaoula université de larbitbessi de tébessa, département physique
- [14] thèse doctorat n. radutoiu « influence des traitements thermiques sur le comportement en corrosion a l'échelle locale de l'alliage d'aluminium en aw2024». institut national polytechnique de toulouse
- [15]a. wilm, recherche sur la métallurgie physique des alliages d'aluminium magnésium, metallurgie 8, 225 (1911).
- [16]h.k. hardy and t.j. heal: report on precipitation, progress in metal physics v, 143-278 (1954).pipelines ». thèsedoctorat :universitébadji mokhtar.2008.

Chapitre II

**Corrélation d'image numérique :
principe et application**



Corrélation d'image numérique : Principe et application

La méthode de corrélation d'images numériques (DIC) est utilisée pour les mesures de déformations et de déplacements dans des éléments plans exposés à des charges. Dans ce chapitre, nous allons décrire brièvement le volet théorique de cette technique ainsi que notre expérience avec son utilisation lors de notre travail expérimental.

Dans le passé, il existe deux méthodes d'arpentage de souches développées dans un objet qui, dans soumis à des forces extérieures. Une méthode consiste à mesurer le déplacement relatif entre deux points spécifiques sur la surface d'un objet, puis estimer la contrainte entre ces deux points. Cependant, la distribution globale de la déformation de l'objet ne peut pas être déterminée directement. L'autre méthode consiste à cartographier des mailles sur la surface d'un objet avant déformation se produit, puis examiner le déplacement des noeuds entourant ces mailles après déformation. En outre, la distribution de déformation d'un objet est dérivée du champ de déplacement. Au contraire, cette technique est un processus complexe et long. La corrélation d'image digitale (DIC) est une méthode d'identification d'image pour mesure de la déformation de l'objet. Les images numériques d'un objet avant et après déformation qui sont capturés à l'aide d'un instrument optique sont soumises à des analyses de corrélation. Les positions correspondantes enregistrées sur l'image sont obtenues en calculant la corrélation coefficient d'images de sorte que la fonction de déplacement et la distribution de déformation d'un objet peut être déduit. Cette technique est non destructive pour inspecter l'ensemble champ de déplacement et de déformation. Récemment, Vellinge & Ornait (2000), Vend roux & Knauss (1998) ont utilisé un microscope électronique pour capturer des images de spécimen dans une région minuscule et puis exécuté l'analyse DIC pour ces images. Ces résultats indiquent que la précision de la méthode DIC est dans la gamme nanométrique. Pour l'application de l'analyse DIC dans crack problème, Dost et al (1999, 2003) ont acquis des images d'objets à l'échelle nanométrique à l'aide d'un microscope à force atomique pour détecter la formation de fissures à l'échelle nanométrique sur des nanomatériaux. En outre, Tunget al (2008) ont inspecté le développement de fissures dans un mur de maçonnerie et ont examiné l'effet déformation de fissures sur la résistance sismique des structures de maçonnerie. La validité de l'application de la technique DIC dans l'observation des fissures pour les matériaux non homogènes a été confirmée par leur étude [1]. Les mesures plein champ peuvent être utilisées de différentes manières, à savoir :



Chapitre II : Corrélation d'image numérique : principe et application

- Pour surveiller les structures en service et les zones faibles qui s'y trouvent (par exemple, les avions, les ponts, les bâtiments).
- Vérifier les conditions aux limites avant d'effectuer lui-même. Dans ce cas, il permet à l'expérimentateur de contrôler si les conditions aux limites correspondent à celles souhaitées.
- Identifier les propriétés des matériaux. Différentes stratégies peuvent être suivies. Dans le cas présent, la mise à jour FE est utilisée pour déterminer certaines propriétés de l'utilisation d'un procédé de corrélation d'images numériques.
- Proposer des scénarios d'endommagement et de rupture en utilisant des modèles d'endommagement et de rupture.

La technique peut être utilisée avec de nombreux tests, y compris la tension, la torsion, la flexion et le chargement combiné pour une application statique et dynamique. Cette technique peut être utilisée de très petites (micro) à de grandes zones de test. [2]

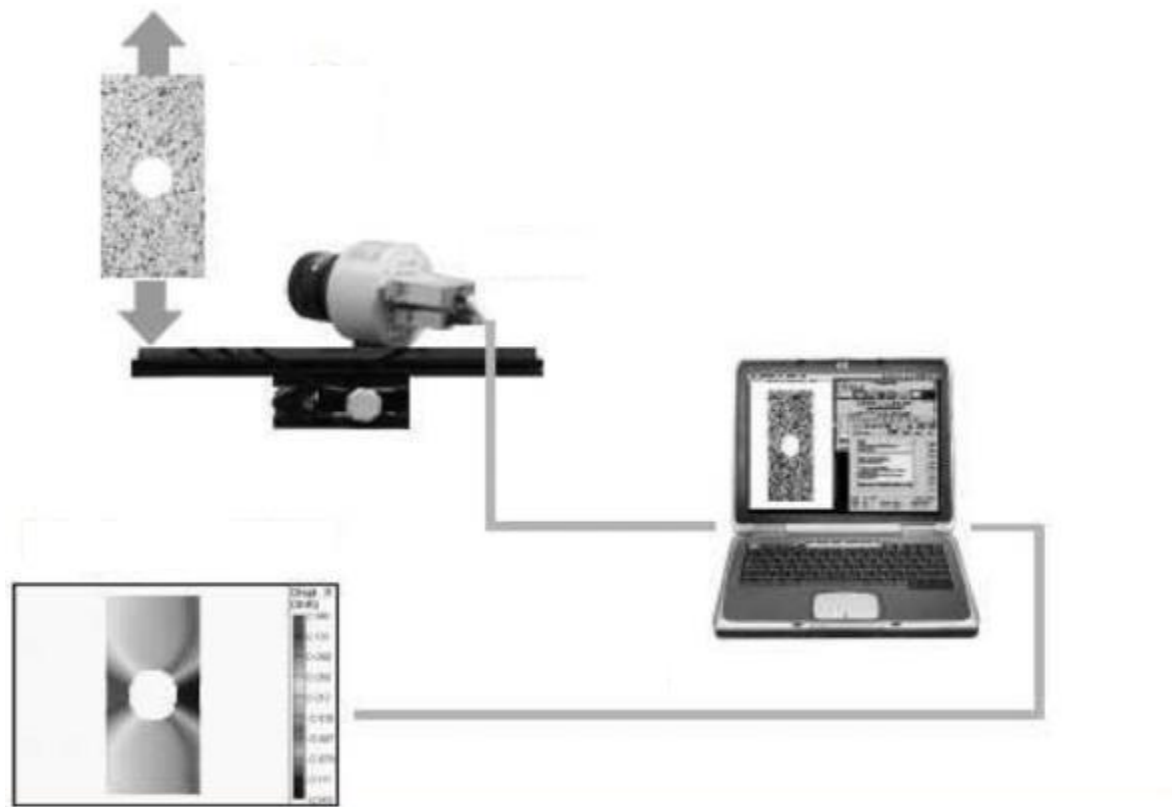


Figure II.1: Schéma d'un montage de corrélation d'images numériques bidimensionnel.



Figure II.2: Montage expérimental de corrélation d'images numériques bidimensionnel : Essai Traction-DIC.

2. Terminologie de la DIC

DIC est une technique de corrélation d'images basée sur des sous-ensembles, les sous-ensembles sont une collection d'un groupe de pixels portant une information de valeur de gris unique pour les mesures de déformation. La distance entre les centres des sous-ensembles est appelée taille de pas. Des fonctions de forme de sous-ensemble sont appliquées aux sous-ensembles de l'image de référence pour approximer la déformation du sous-ensemble dans l'image déformée. Il s'agit essentiellement d'une transformation des coordonnées de pixels du sous-ensemble dans l'image de référence aux coordonnées de l'image déformée. La fonction



de corrélation est utilisée pour faire correspondre les sous-ensembles dans les images déformées et non déformées. [3]

2. Principe de DIC

La corrélation d'images numériques est une application basée sur la comparaison de deux images acquises à des états différents, l'une avant déformation et l'autre après. Ces deux images sont appelées images de référence et images déformées dans le cadre de cet article. Après acquisition par une caméra CCD, ces images sont numérisées et stockées sur un disque dur informatique pour analyse. Deux sous-ensembles sont choisis respectivement parmi les images de référence et déformées pour la corrélation. L'algorithme de corrélation, détectant les déplacements locaux u et v en comparant les deux sous-ensembles d'images, est le suivant. Le point intéressé dans l'image de référence est caractérisé par un sous-ensemble rectangulaire, une zone de pixels ($n \times m$). Le sous-ensemble correspondant, également une zone de pixels ($n \times m$), dans l'image déformée est estimée à un certain emplacement avec une plage spécifiée. Une routine de recherche fine, pixel par pixel, est effectuée dans la plage spécifiée dans l'image déformée. L'emplacement p le plus proche au niveau du pixel, comme le montre la Figure 3, est sélectionné en fonction de l'occurrence du motif le mieux adapté, qui a la valeur minimale du coefficient croisé mutuel $r(i, j)$. [4].

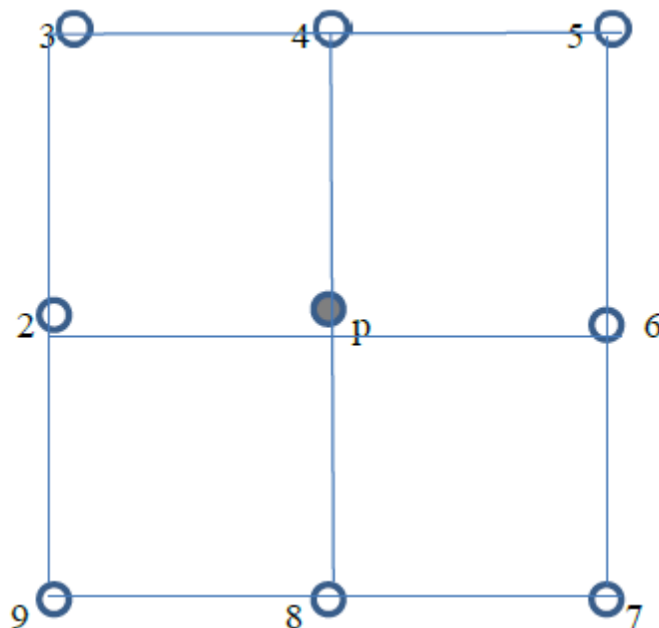


Figure II.3: solution au niveau du pixel (p) et ses voisins.



Où $A(i, j)$ est le niveau de gris à l'emplacement de (i, j) dans l'image de référence, $B(I', j')$ représente le niveau de gris à l'emplacement de (I', j') dans l'image déformée. La relation entre (i, j) et (I', j') pourrait être décrite comme suit :

$$i' = i + u$$

$$j' = j + v$$

Où u, v représentent le déplacement du pixel de (i, j) dans les directions horizontale et verticale, respectivement. [7]

L'étape suivante consiste à décider des valeurs exactes de u et v . L'emplacement p le plus proche sélectionné et ses huit emplacements de pixels voisins constitueront une surface d'ajustement qui peut être représentée par une fonction quadratique à deux dimensions $f(x, y)$.

$$F(x, y) = a_1x^2 + a_2y^2 + a_3xy + a_4x + a_5y + a_6$$

On suppose que les déplacements u et v pourraient être définis en fonction de l'emplacement de la valeur minimale de la surface d'ajustement. Ainsi, pour trouver les valeurs de u et v , il faut résoudre un ensemble de neuf équations linéaires.

$$B \times a = r$$

Où B est une matrice (9×6) , constituée de l'évaluation de chaque terme dans la fonction $f(x, y)$, a est un vecteur (6×1) , représentant les coefficients inconnus $a_1..a_6$, r est un vecteur (9×1) constitué de l'évaluation de $r(i, j)$ aux emplacements. Puisque le nombre d'inconnues est inférieur au nombre d'équations, on s'attend à trouver la solution des moindres carrés à cet ensemble d'équations linéaires déterminé. Les évaluations de u et v peuvent être obtenues en résolvant les équations linéaires suivantes :

$$df/dx = 0$$

$$df/dy = 0$$

Les champs de déplacement de u et v peuvent alors être déterminés simplement en substituant un vecteur r différent dans le processus d'itération ci-dessus. [7].



3. Application de la DIC combinée à l'essai de traction

Dans cette partie, nous allons décrire l'essai de traction combiné au mesure par corrélation d'image numérique (DIC). Il s'agit d'étudier les champs de déplacements et de déformations sur un alliage d'aluminium 2024. L'alliage est obtenu sous forme de plaque de faible épaisseur (1.6 mm).

L'essai de traction est le moyen le plus couramment employé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive à vitesse de déchargement faible ou modérée. L'essai permet, en outre, l'étude et l'identification des mécanismes physiques de déformation plastique. Cette dernière, gouverne le processus majeur de mise en forme, par ou sans enlèvement de matière, des matériaux dans la plupart des procédés de fabrication utilisés dans l'industrie mécanique.

La machine de traction (MTS Criterion TM model C45.105) (Figure 4), est constituée d'un bâti rigide équipé d'un travers fixe à laquelle est fixée l'une des têtes de l'éprouvette l'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à une traverse mobile. Le mouvement de la traverse mobile est assuré par une commande hydraulique. La formation et les dimensions de l'éprouvette selon la norme ASTM-E-1, sont présentées dans la Figure 5.

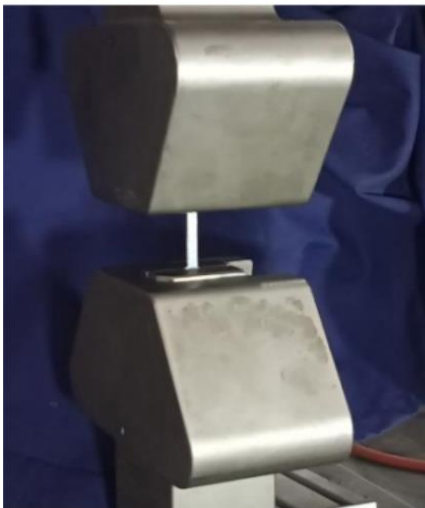


Figure II.4: Machine de traction (MTS Criterion TM model C45.105).

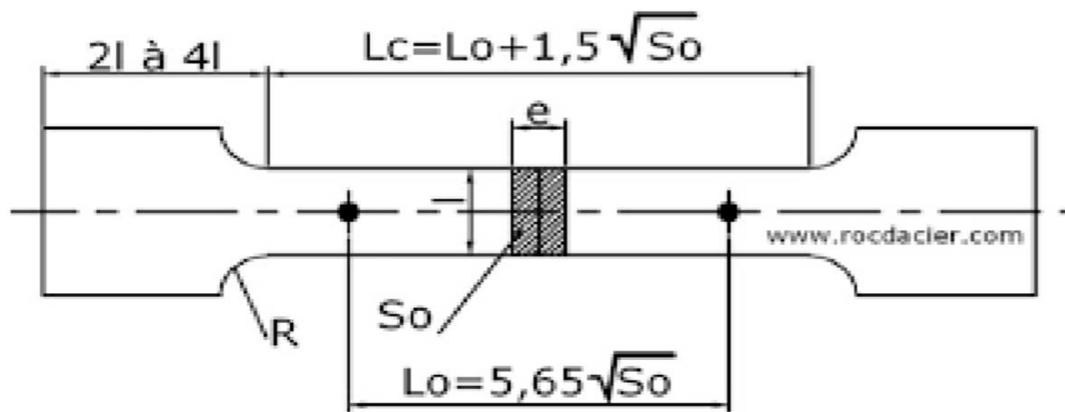


Figure II.5: Dimensions de l'éprouvette de traction.

3.1. Préparation de la surface de l'éprouvette pour l'essai de Traction-DIC

Lors de notre stage, nous avons réalisé des essais de traction combinés à la corrélation d'image numérique (DIC-2D). Les essais de traction avec la DIC nécessitent une préparation particulière des éprouvettes. Il s'agit d'appliquer un mouchetis sur l'éprouvette, plus particulièrement sur la zone utile étudiée. À l'aide d'une caméra, un suivi du déplacement des points formés par le mouchetis est enregistré en comparant l'intensité de gris avant et après déformation. En déterminant le déplacement de chaque point dans l'éprouvette, il est possible de calculer la déformation. Afin de réaliser le mouchetis, une peinture blanche est appliquée sur la zone utile de l'éprouvette. Dès que cette peinture sèche, une autre peinture noire est appliquée à l'aide d'une bombe. Ainsi un mouchetis noir sur fond blanc est créé avec des points noirs les plus fins possible (Figure II.6). Une bonne adhérence de la peinture est nécessaire afin de résister à l'apparition des fissures à la surface de l'éprouvette lorsqu'elle est soumise à une contrainte mécanique. La caméra est placée perpendiculairement et à une distance appropriée par rapport à la surface de l'échantillon de telle sorte que toute la zone utile étudiée soit observée dans toutes les images prises par la caméra. Ensuite, une image de référence initiale est enregistrée par la caméra. Le chargement monotone de l'éprouvette et la capture d'images par la caméra seront démarrés en même temps, jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette.



Figure II.6: Eprouvette de fatigue usinées et polies.

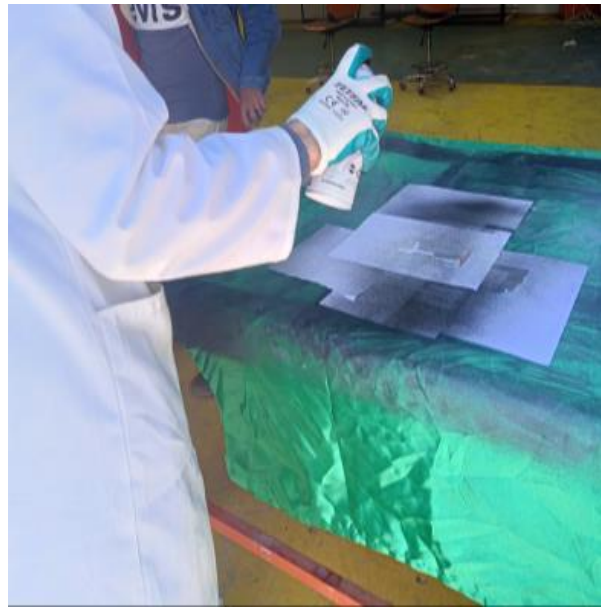


Figure II.7: Processus de revêtement.

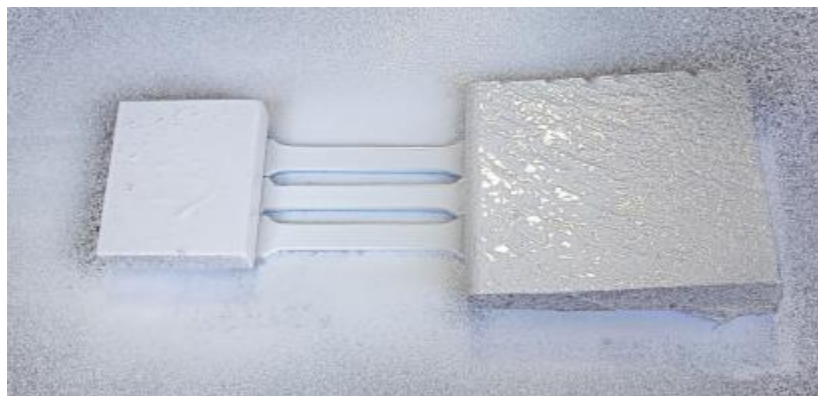


Figure II.8: Eprouvette à moucheté.



Figure II.9: La fin d'opération de moucheté.



3.1.1. Essai de traction

L'essai de traction a été effectué sur des éprouvettes de l'alliage d'aluminium 2024 choisi à température ambiante (25 °C), dans un environnement d'air de laboratoire à l'aide d'une sur une machine de traction uni-axiale de type MTS Criterion TM model C45.105, commandée par ordinateur. Les éprouvettes ont été entre les deux mors de chargement. Une charge de traction jusqu'à ce que la rupture finale de l'éprouvette. Toutes les éprouvettes d'essai ont été usinés de sorte que l'axe de contrainte principal était le long de la direction longitudinale du stock de plaques tel que fourni. L'épaisseur de l'éprouvette était de 1.6mm. Toutes les éprouvettes ont été finies pour éviter toute concentration de contraintes. Les essais de traction ont été réalisés à trois vitesses de déformation constantes (0.01 S⁻¹, 0.005 S⁻¹ et 0.001 S⁻¹).

La vérification portait sur la dimension de l'éprouvette, la nature de la finition de surface et la planéité globale pour se conformer aux tolérances spécifiées. Avant le début d'un essai, une inspection visuelle de la section réduite de l'éprouvette a été effectuée pour s'assurer que l'éprouvette est endommagée de manière minimale ou nulle. Les dommages doivent inclure les rainures, les bavures, les surfaces rugueuses, les bords ou de tout défaut pouvant être un site potentiel de concentration de contraintes et d'initiation précoce de la défaillance. À partir de l'essai de traction, (i) le module d'élasticité, (ii) la limite d'élasticité, (iii) la résistance à la traction ultime et (d) l'allongement à la rupture ou à la ductilité peuvent être déterminés.

La Figure II.10 à représente l'éprouvette déformé après essai de traction.

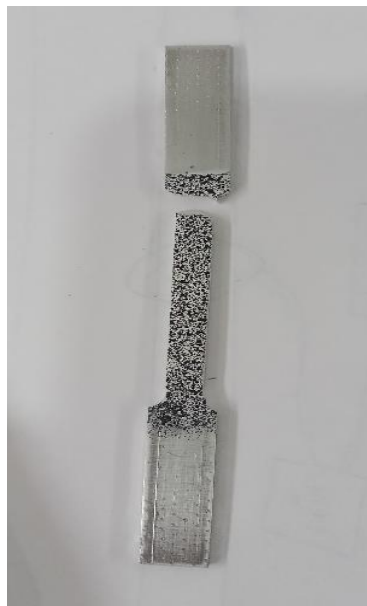


Figure II.10: Eprouvette déformé après essai de traction.



3.1.2. Courbes de traction

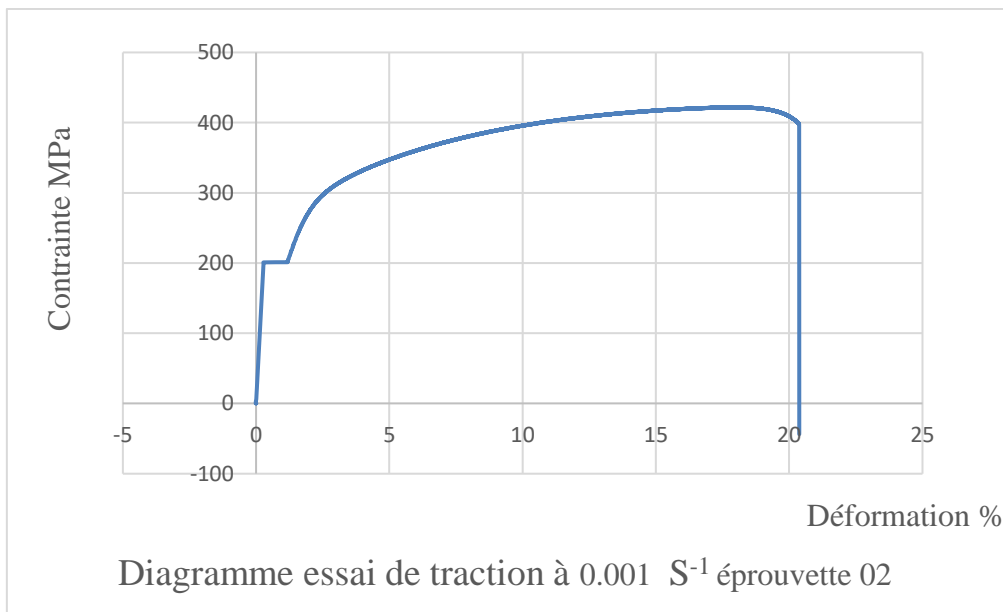
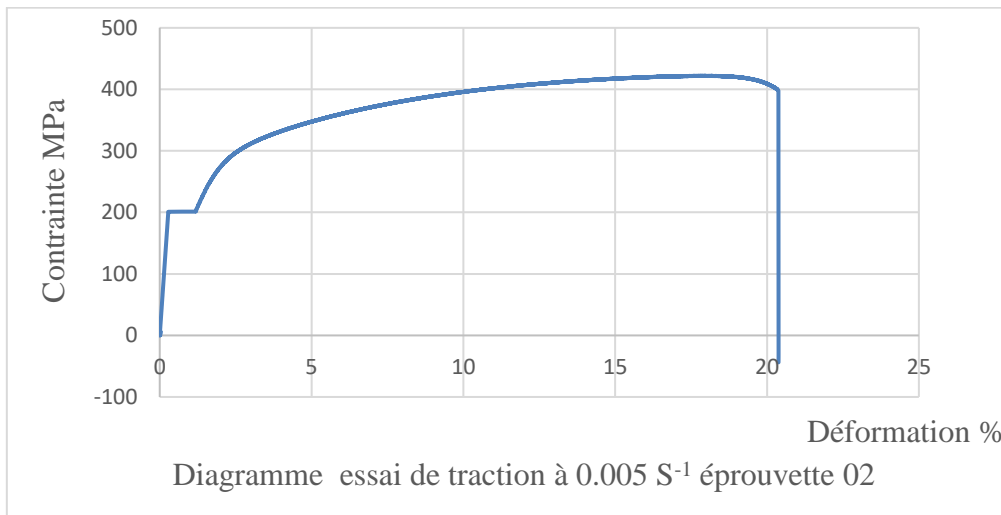
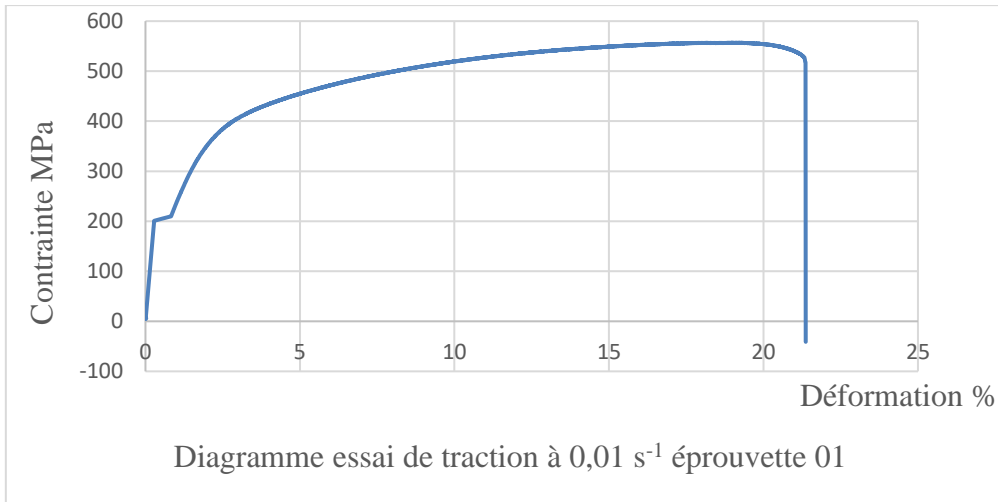


Figure II.11: Courbes de traction de l'aluminium 2024.



	Résistens mécanique R_m (Mpa)	Résistens élastique R_e (Mpa)	Module de yonge E (Gpa)	Deformation ϵ (%)
Eprouvette 01	556.26	209.85	40.60	21.33
Eprouvette 02	421.5	201.16	40.60	20.38
Eprouvette 03	421.85	201.16	40.60	20.38

Tableau II.1: Grandeurs Caractéristiques de l'aluminium 2024.

3.2. Programme utilisé pour traitement d'image de DIC

Afin de traiter les images obtenues par la caméra est un programme « Open source Ncorr ».

Ncorr est un programme MATLAB open source de corrélation d'images numériques 2D. Il dispose d'une interface graphique accessible et intuitive, utilise de nombreux nouveaux algorithmes DIC 2D, et est entièrement contenu dans l'environnement MATLAB. Il contient des outils de traçage pour la création de figures.

Ce programme vise à :

1. Développer un code robuste et open-source pour la corrélation d'images numériques 2D
2. Fournir des ressources pour l'utilisation/compréhension du programme et des algorithmes DIC sous-jacents
3. Afficher des applications et des exemples du programme Recevoir des critiques constructives des utilisateurs pour aider à améliorer le programme et les ressources sur ce site Web

Quelques instantanés de l'interface graphique sont présentés dans les images ci-dessous :



Chapitre II : Corrélation d'image numérique : principe et application

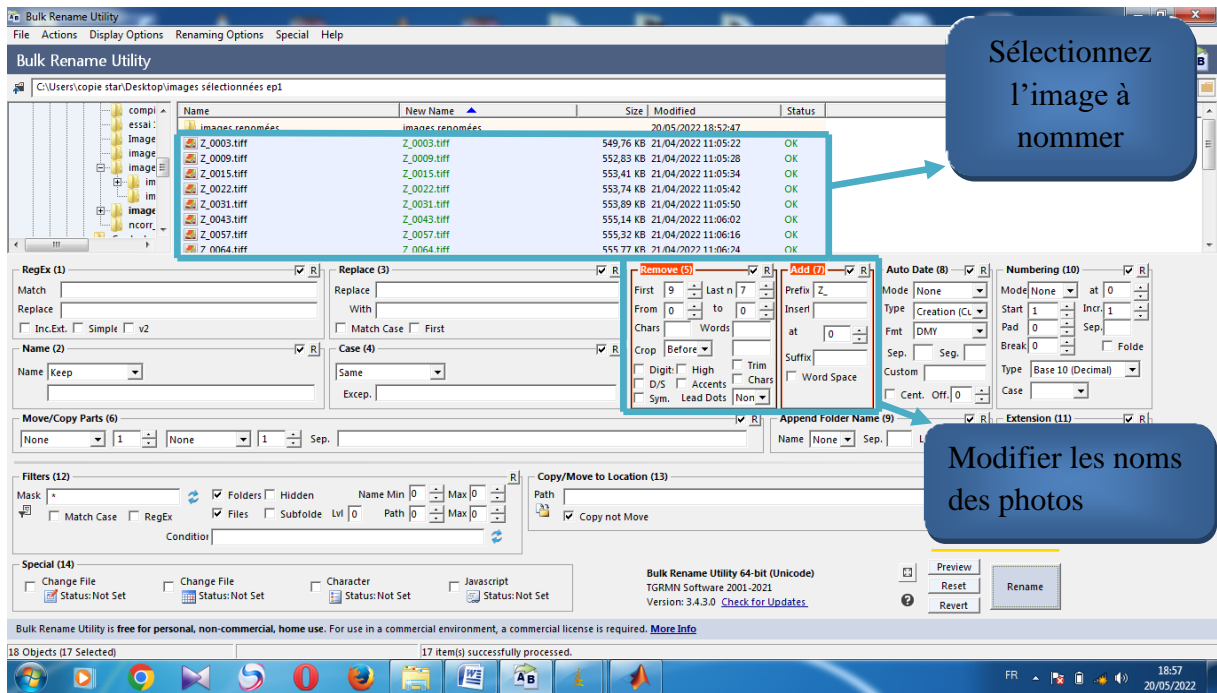


Figure II.12: logiciel de Bulk Rename Utility.

Sélection d'images à l'aide de l'application Image J, dans laquelle nous planifions la pièce à étudier comme indique sur la figure II.14.

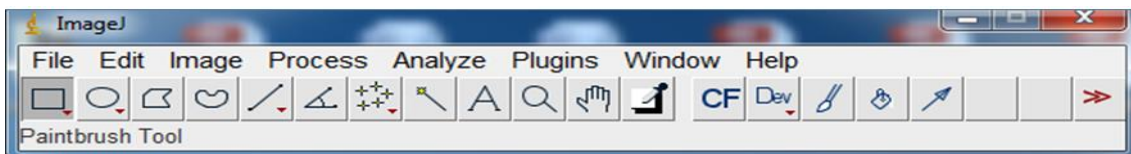


Figure II.13: programme Image J.

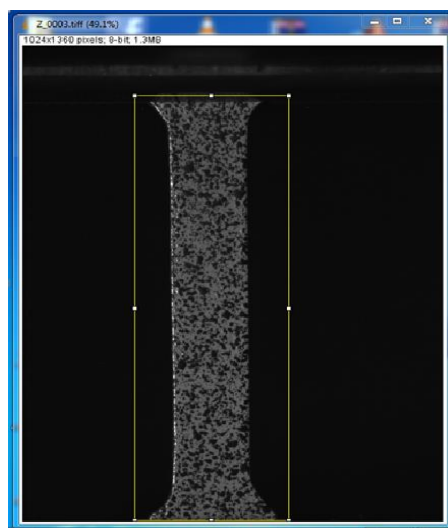


Figure II.14: La partie étudiée.



Chapitre II : Corrélation d'image numérique : principe et application

La fin du traitement de la pièce étudiée, comme le montre la figure II.15.

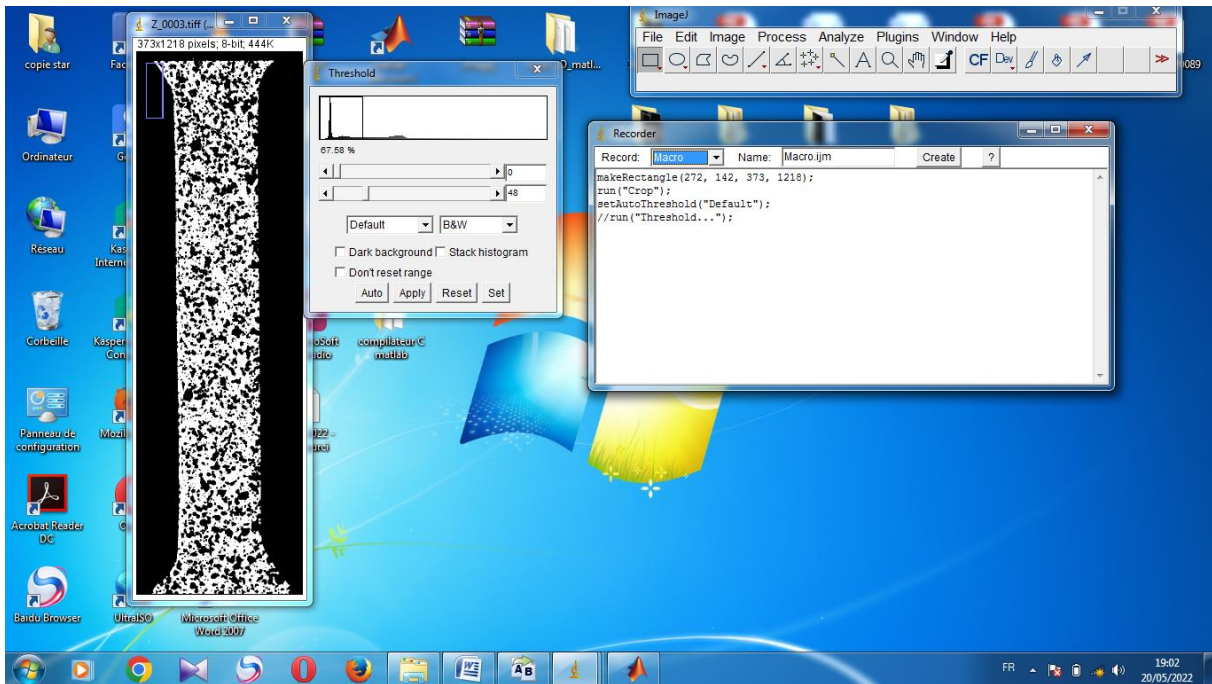


Figure II.15: La fin du traitement de la pièce étudiée.

Ouvrez le programme MATLAB et téléchargez le fichier Ncorr dedans.

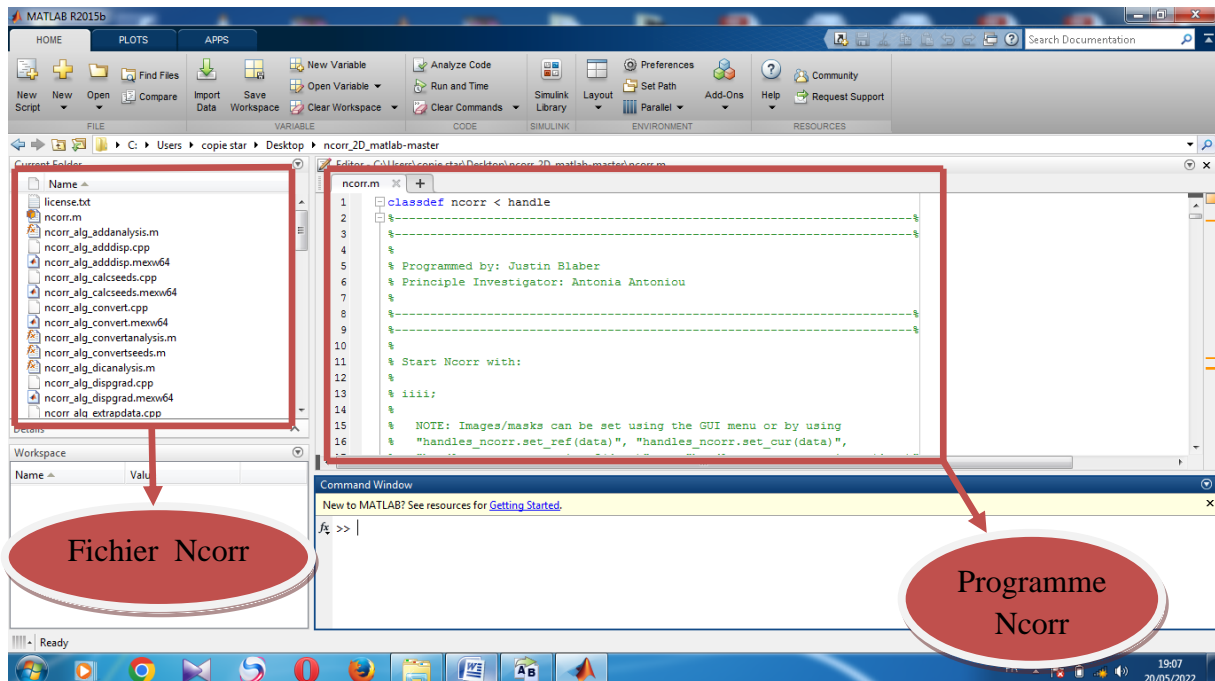


Figure II.16: Programme MATLAB.



Chapitre II : Corrélation d'image numérique : principe et application

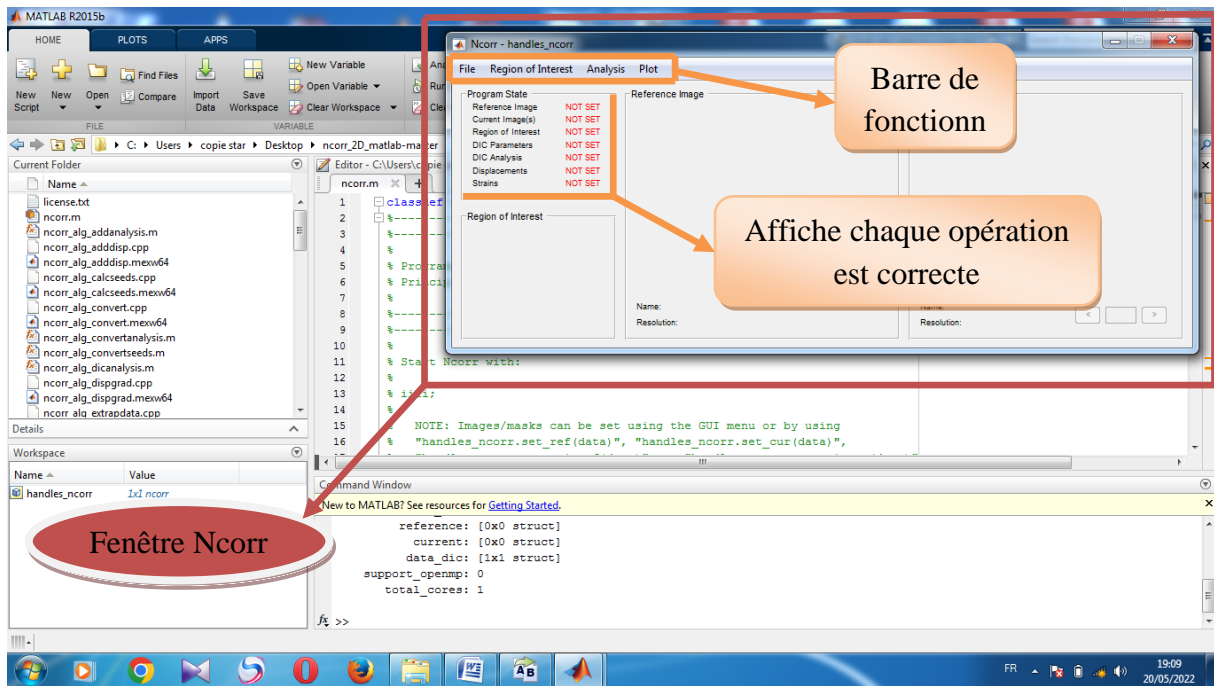
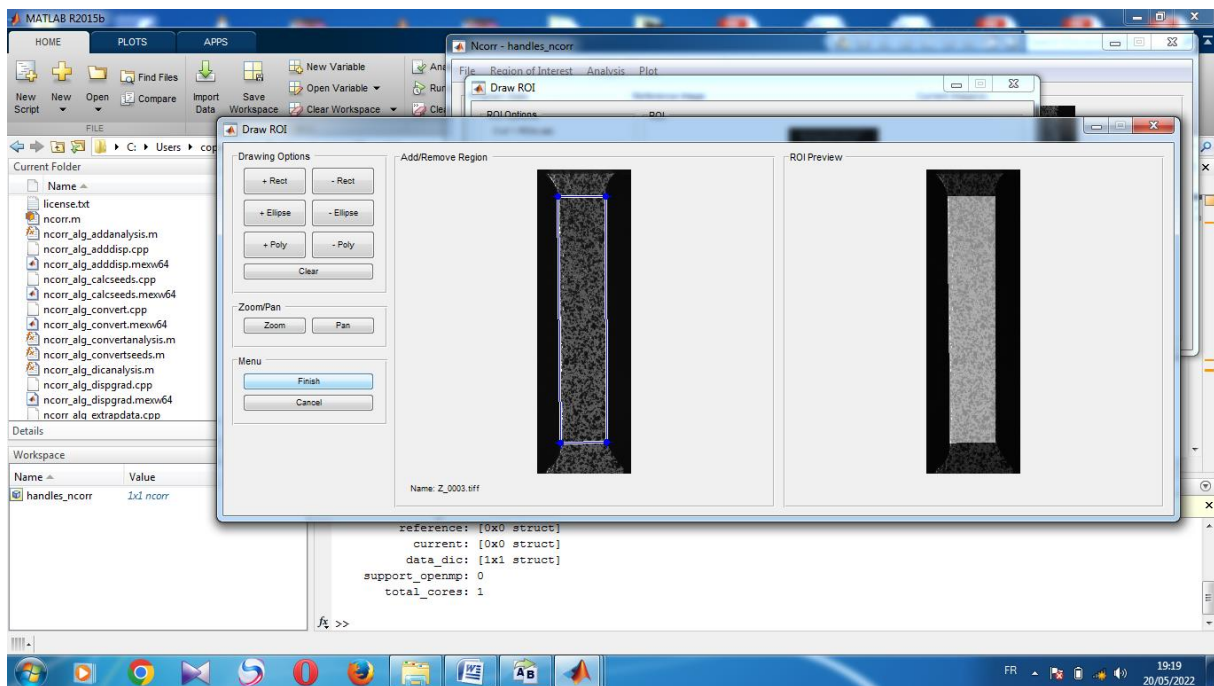


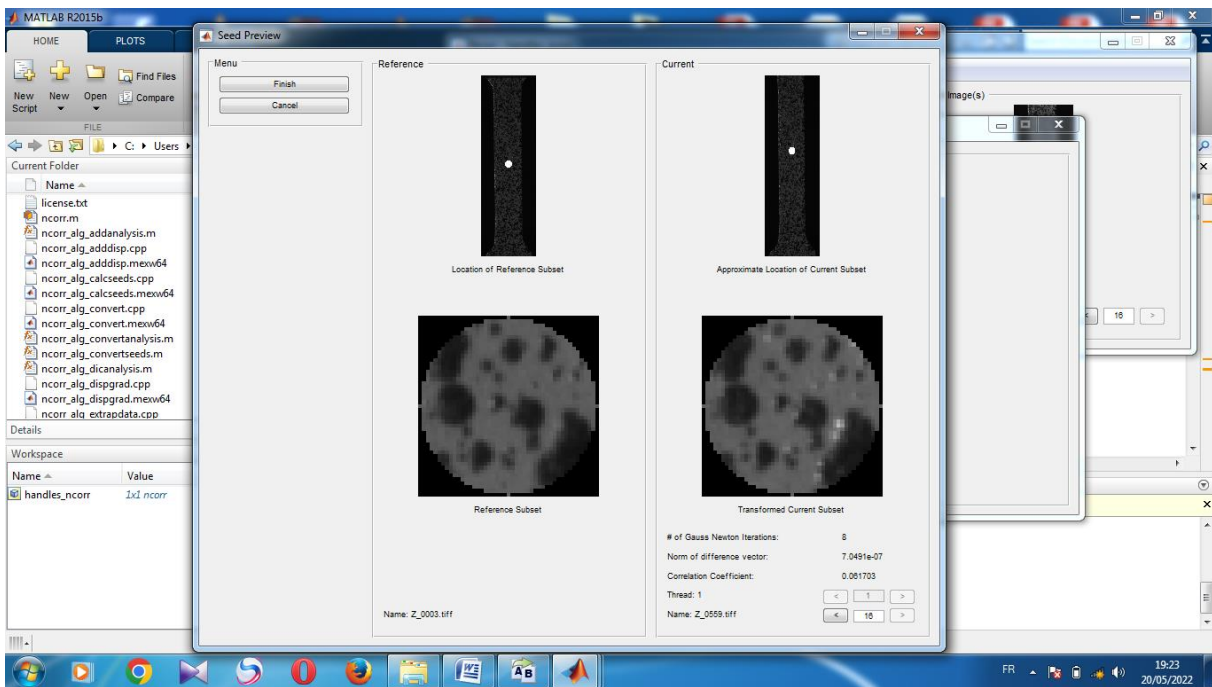
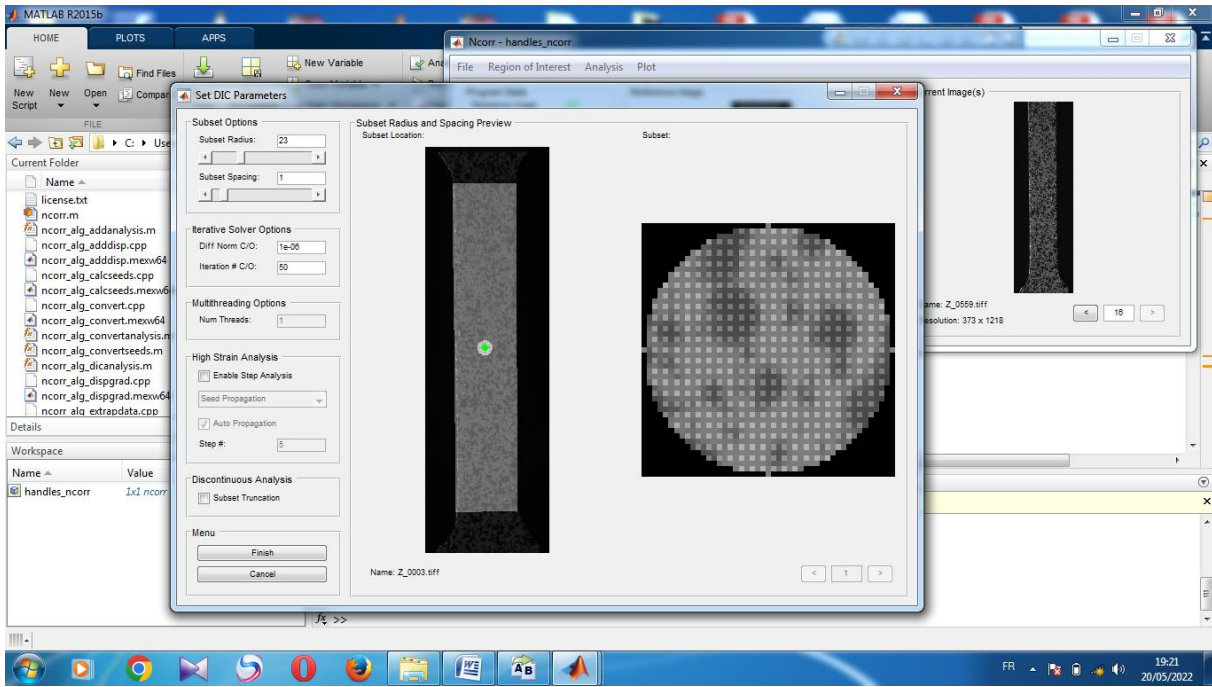
Figure II.17: Ouvrir la fenetre Ncorr.

Chaque processus qui se déroule dans la fenetre Ncorr est illustré dans les captures d'écran comme suit :





Chapitre II : Corrélation d'image numérique : principe et application





Chapitre II : Corrélation d'image numérique : principe et application

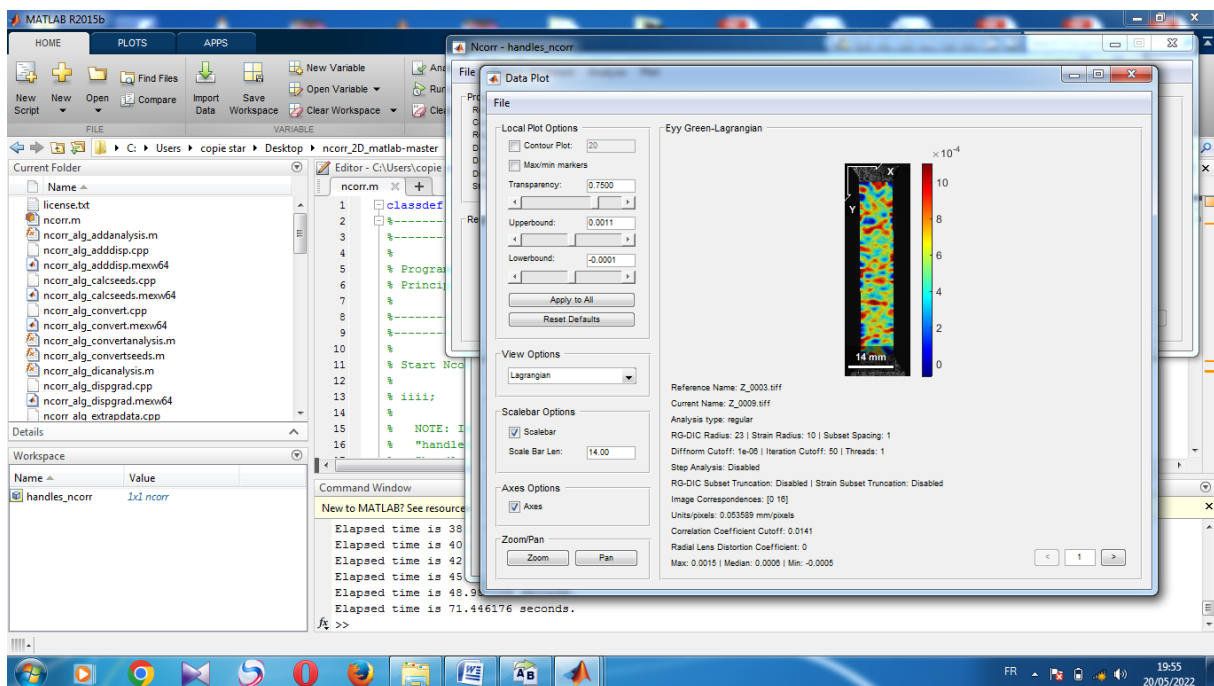
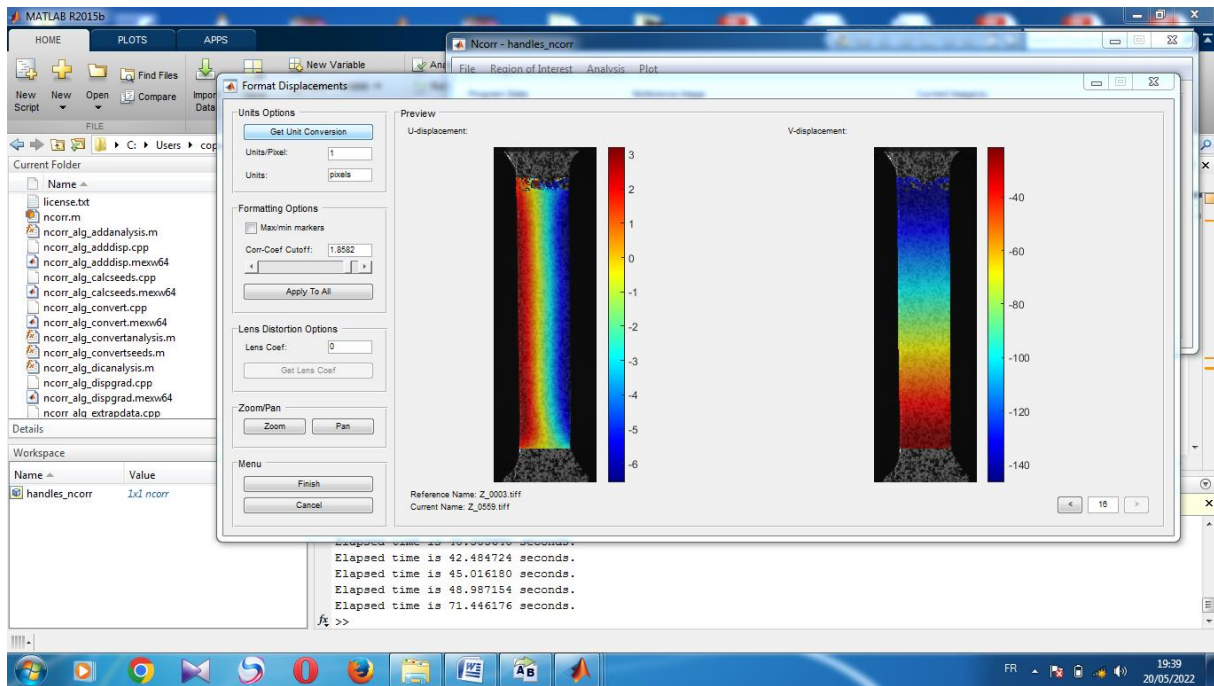
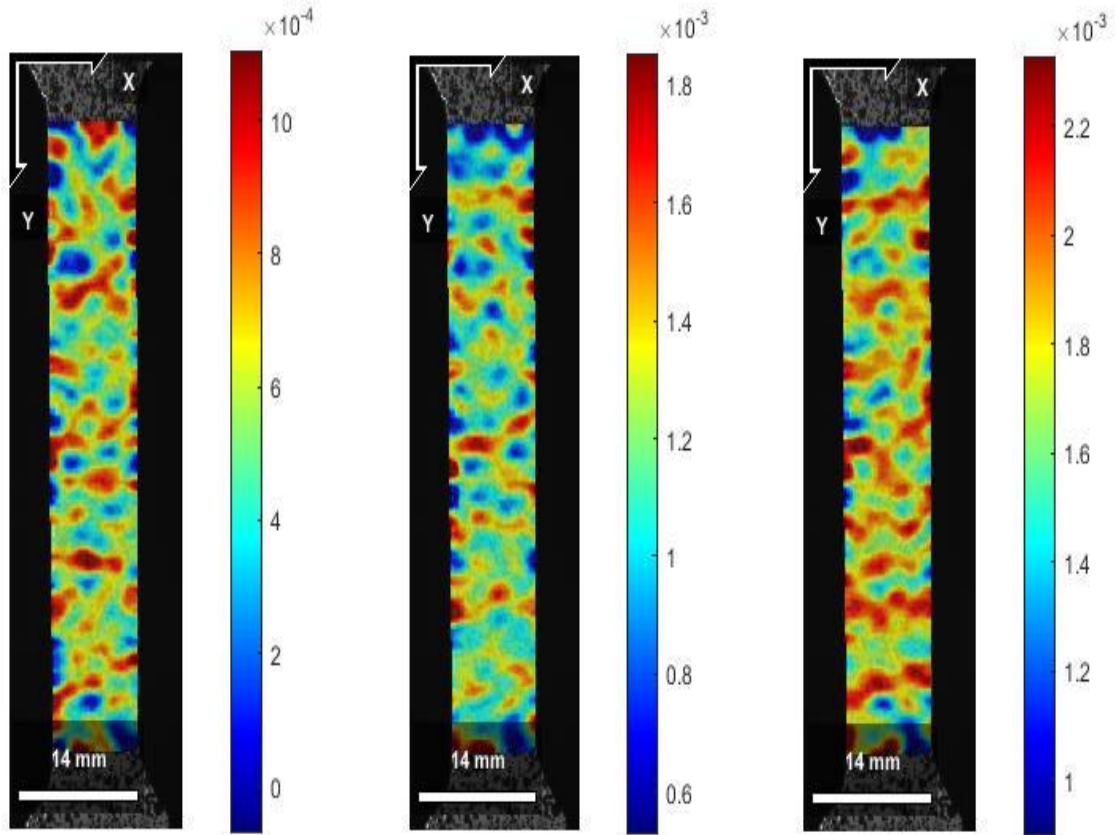


Figure II.18: La dernière opération à Ncorr et c'est un résultat.



3.3. Résultats DIC

3.3.1. Les résultats d'éprouvette numéros (1)



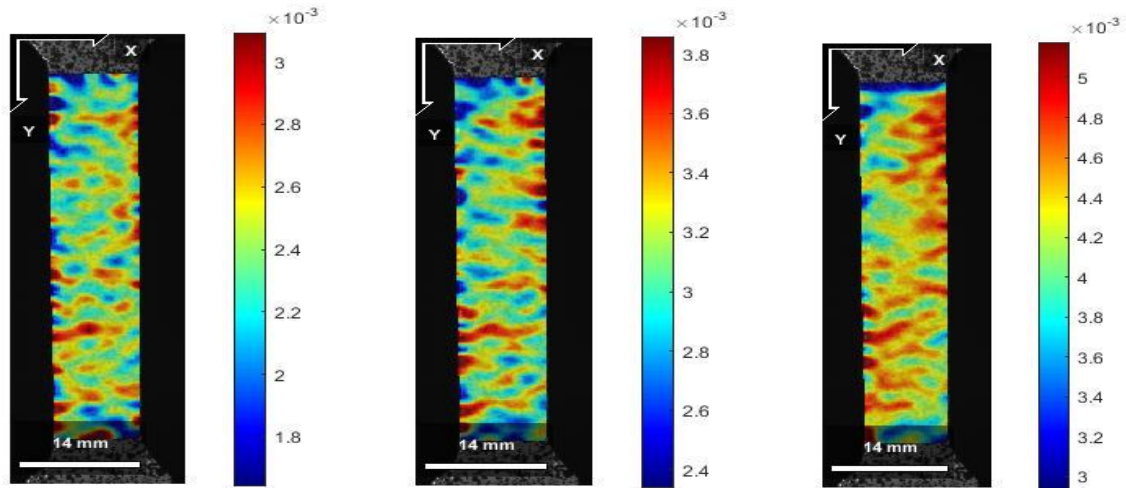
Type: eyy-plot
 Reference Name: Z_0003.tiff
 Current Name: Z_0009.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 23 | Strain Radius: 10 | Subset Spacing
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 | Threads:
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain Subset Tru
 Image Correspondences: [0 16]
 Units/pixels: 0.053589 mm/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.0141
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.0015 | Median: 0.0006 | Min: -0.0005

Type: eyy-plot
 Reference Name: Z_0003.tiff
 Current Name: Z_0015.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 23 | Strain Radius: 10 | Subset Spacing
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 | Threads:
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain Subset Tru
 Image Correspondences: [0 16]
 Units/pixels: 0.053589 mm/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.0144
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.0029 | Median: 0.0012 | Min: -0.0001

Type: eyy-plot
 Reference Name: Z_0003.tiff
 Current Name: Z_0022.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 23 | Strain Radius: 10 | Subset Spacing
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 | Threads:
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain Subset Tru
 Image Correspondences: [0 16]
 Units/pixels: 0.053589 mm/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.0142
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.0028 | Median: 0.0018 | Min: 0.0004



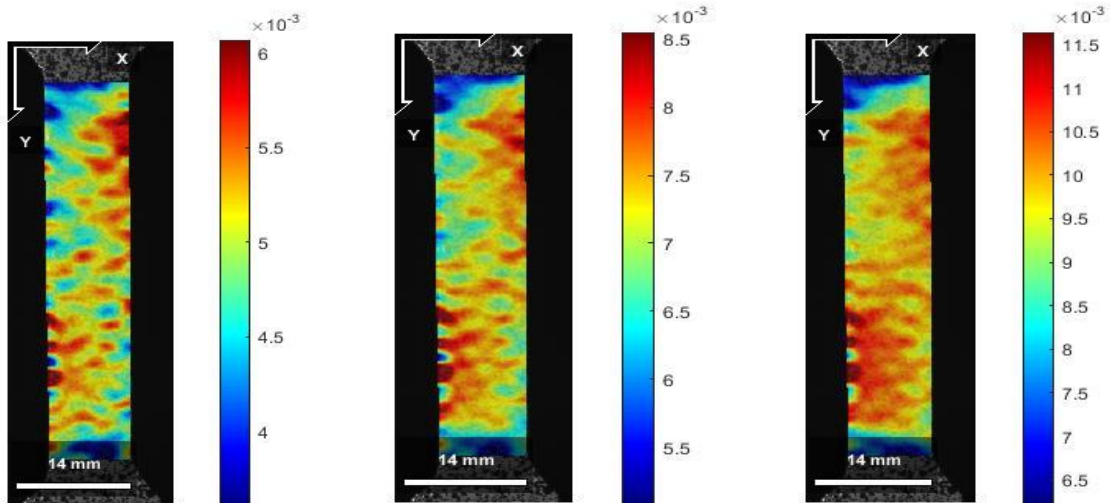
Chapitre II : Corrélation d'image numérique : principe et application



Type: eyy-plot
Reference Name: Z_0003.tiff
Current Name: Z_0031.tiff
Analysis type: regular
RG-DIC Radius: 23 | Strain Radius: 10 | Subset Spacing
Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 | Threads:
Step Analysis: Disabled
RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain Subset Tru
Image Correspondences: [0 16]
Units/pixels: 0.053589 mm/pixels
Correlation Coefficient Cutoff: 0.0137
Radial Lens Distortion Coefficient: 0
Max: 0.0037 | Median: 0.0024 | Min: 0.0004

Type: eyy-plot
Reference Name: Z_0003.tiff
Current Name: Z_0043.tiff
Analysis type: regular
RG-DIC Radius: 23 | Strain Radius: 10 | Subset Spacing
Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 | Threads:
Step Analysis: Disabled
RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain Subset Tru
Image Correspondences: [0 16]
Units/pixels: 0.053589 mm/pixels
Correlation Coefficient Cutoff: 0.0144
Radial Lens Distortion Coefficient: 0
Max: 0.0043 | Median: 0.0031 | Min: 0.0016

Type: eyy-plot
Reference Name: Z_0003.tiff
Current Name: Z_0057.tiff
Analysis type: regular
RG-DIC Radius: 23 | Strain Radius: 10 | Subset Spacing
Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 | Threads:
Step Analysis: Disabled
RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain Subset Tru
Image Correspondences: [0 16]
Units/pixels: 0.053589 mm/pixels
Correlation Coefficient Cutoff: 0.0142
Radial Lens Distortion Coefficient: 0
Max: 0.0071 | Median: 0.0043 | Min: 0.0013



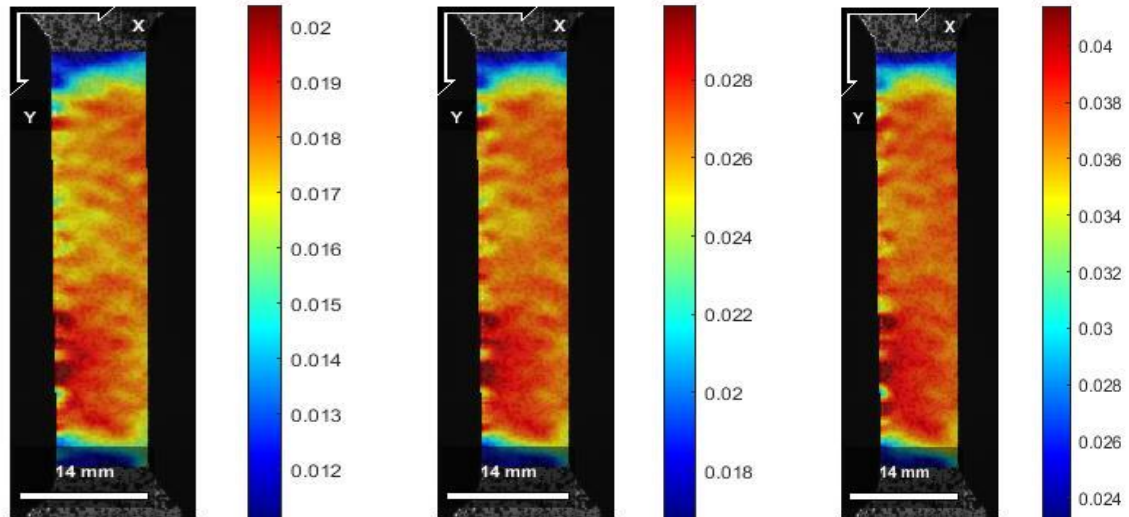
Type: eyy-plot
Reference Name: Z_0003.tiff
Current Name: Z_0064.tiff
Analysis type: regular
RG-DIC Radius: 23 | Strain Radius: 10 | Subset Spacing
Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 | Threads:
Step Analysis: Disabled
RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain Subset Tru
Image Correspondences: [0 16]
Units/pixels: 0.053589 mm/pixels
Correlation Coefficient Cutoff: 0.0143
Radial Lens Distortion Coefficient: 0
Max: 0.0079 | Median: 0.0051 | Min: 0.0026

Type: eyy-plot
Reference Name: Z_0003.tiff
Current Name: Z_0078.tiff
Analysis type: regular
RG-DIC Radius: 23 | Strain Radius: 10 | Subset Spacing
Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 | Threads:
Step Analysis: Disabled
RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain Subset Tru
Image Correspondences: [0 16]
Units/pixels: 0.053589 mm/pixels
Correlation Coefficient Cutoff: 0.0165
Radial Lens Distortion Coefficient: 0
Max: 0.0112 | Median: 0.0072 | Min: 0.0037

Type: eyy-plot
Reference Name: Z_0003.tiff
Current Name: Z_0091.tiff
Analysis type: regular
RG-DIC Radius: 23 | Strain Radius: 10 | Subset Spacing
Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 | Threads:
Step Analysis: Disabled
RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain Subset Tru
Image Correspondences: [0 16]
Units/pixels: 0.053589 mm/pixels
Correlation Coefficient Cutoff: 0.0165
Radial Lens Distortion Coefficient: 0
Max: 0.0146 | Median: 0.0099 | Min: 0.0049



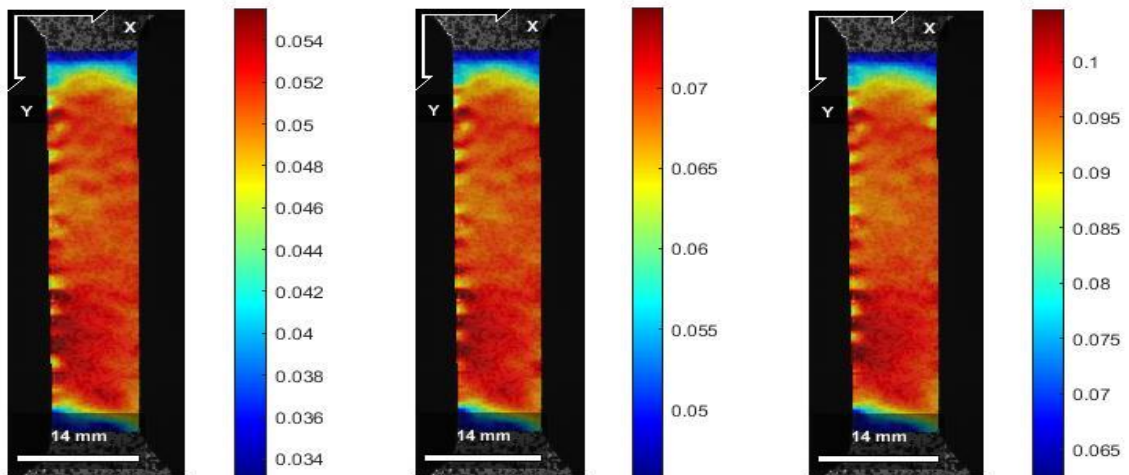
Chapitre II : Corrélation d'image numérique : principe et application



Type: eyy-plot
 Reference Name: Z_0003.tiff
 Current Name: Z_0122.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 23 | Strain Radius: 10 | Subset Spacing
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 | Threads:
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain Subset Tru
 Image Correspondences: [0 16]
 Units/pixels: 0.053589 mm/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.0265
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.0240 | Median: 0.0178 | Min: 0.0094

Type: eyy-plot
 Reference Name: Z_0003.tiff
 Current Name: Z_0154.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 23 | Strain Radius: 10 | Subset Spacing
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 | Threads:
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain Subset Tru
 Image Correspondences: [0 16]
 Units/pixels: 0.053589 mm/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.0419
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.0343 | Median: 0.0267 | Min: 0.0147

Type: eyy-plot
 Reference Name: Z_0003.tiff
 Current Name: Z_0192.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 23 | Strain Radius: 10 | Subset Spacing
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 | Threads:
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain Subset Tru
 Image Correspondences: [0 16]
 Units/pixels: 0.053589 mm/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.0801
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.0469 | Median: 0.0372 | Min: 0.0161



Type: eyy-plot
 Reference Name: Z_0003.tiff
 Current Name: Z_0240.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 23 | Strain Radius: 10 | Subset Spacing
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 | Threads:
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain Subset Tru
 Image Correspondences: [0 16]
 Units/pixels: 0.053589 mm/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.0958
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.0599 | Median: 0.0511 | Min: 0.0286

Type: eyy-plot
 Reference Name: Z_0003.tiff
 Current Name: Z_0301.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 23 | Strain Radius: 10 | Subset Spacing
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 | Threads:
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain Subset Tru
 Image Correspondences: [0 16]
 Units/pixels: 0.053589 mm/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.1525
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.0815 | Median: 0.0691 | Min: 0.0420

Type: eyy-plot
 Reference Name: Z_0003.tiff
 Current Name: Z_0387.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 23 | Strain Radius: 10 | Subset Spacing
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 | Threads:
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain Subset Tru
 Image Correspondences: [0 16]
 Units/pixels: 0.053589 mm/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.2287
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.1169 | Median: 0.0958 | Min: 0.0569

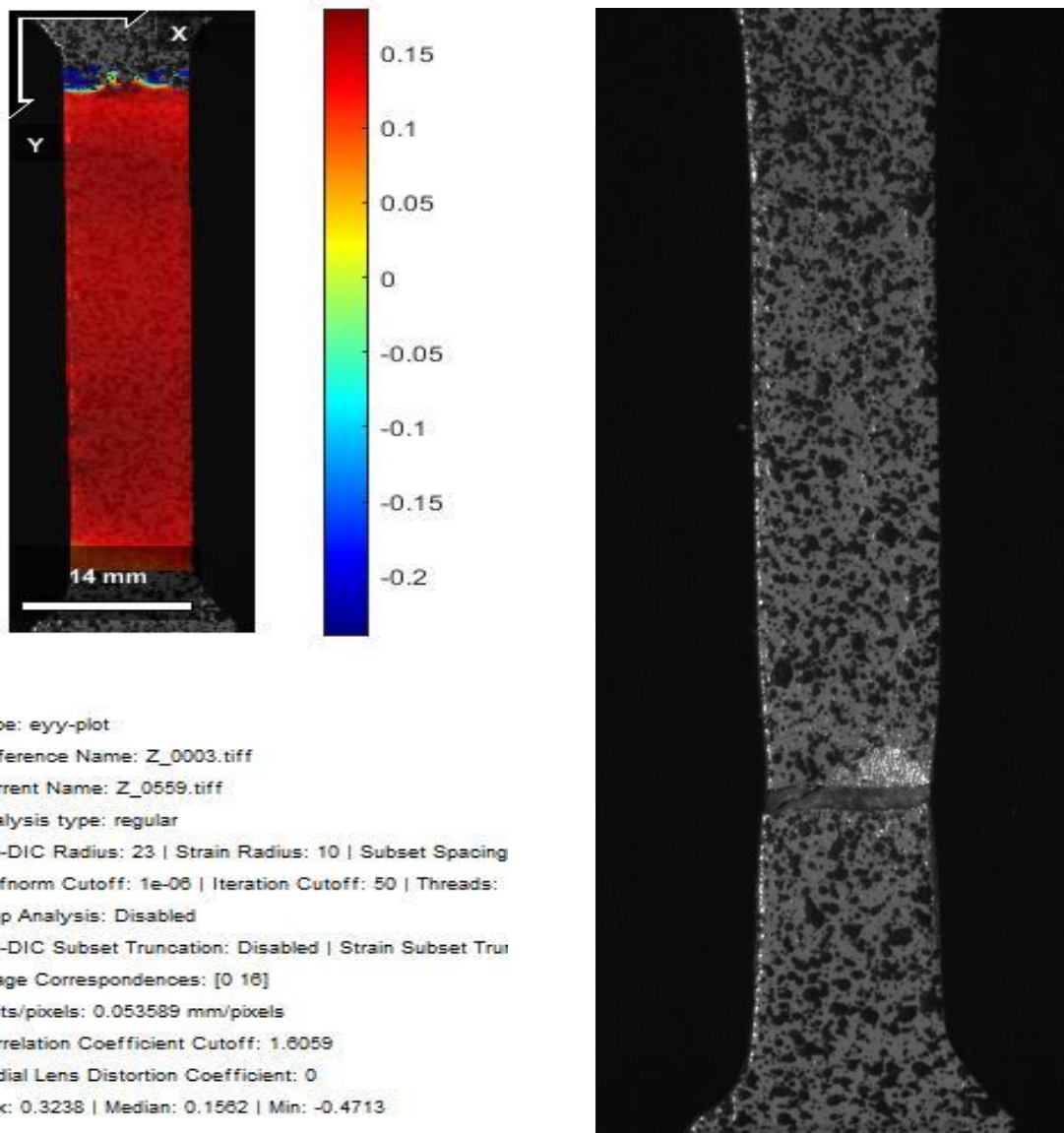
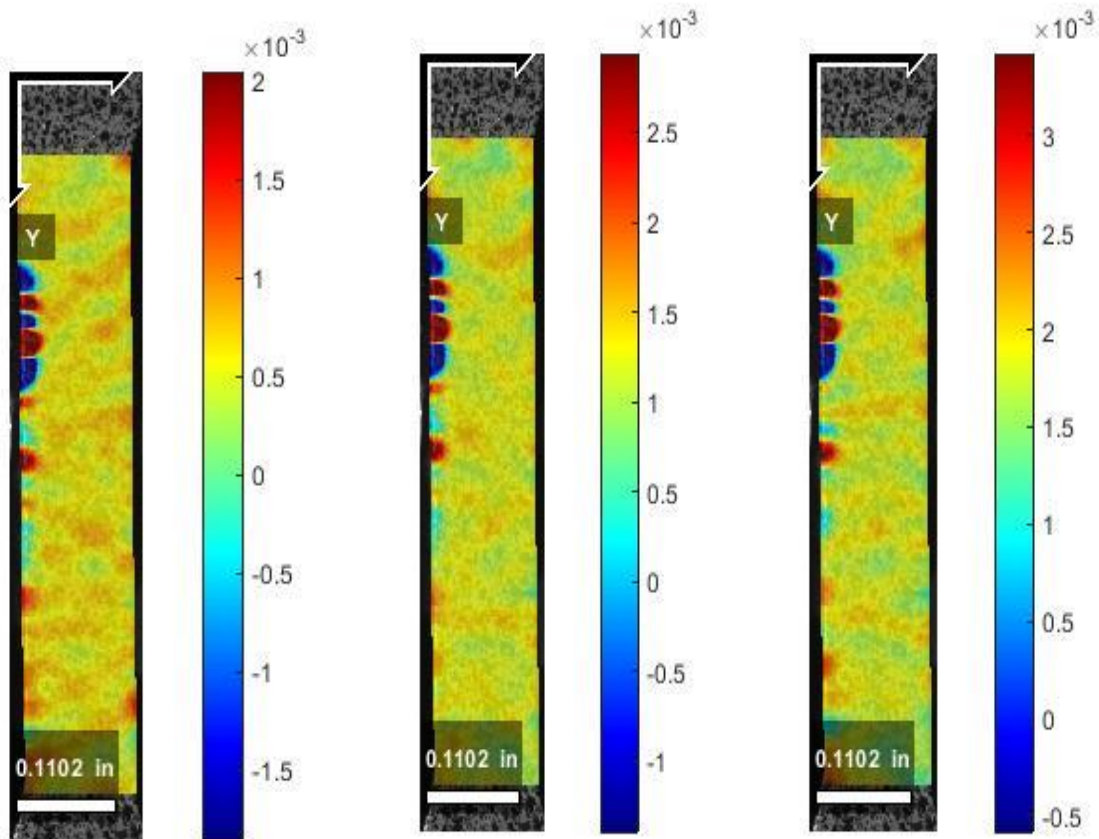


Figure II.19: Éprouvette (01) après la rupture



4.3.2. Les résultats d'éprouvette numéros (2)



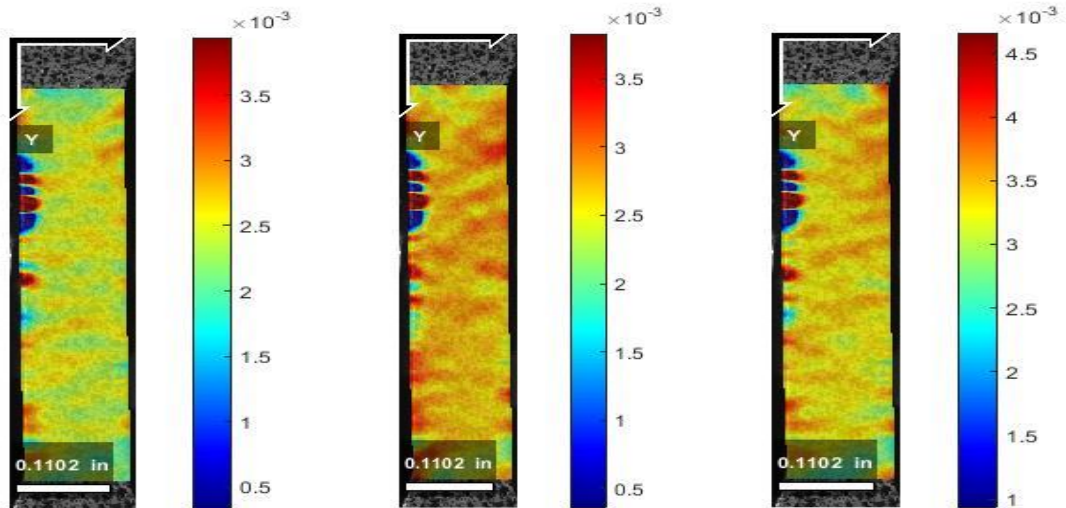
Type: eyy-plot
 Reference Name: R_00010.tiff
 Current Name: R_00012.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
 Image Correspondences: [0 18]
 Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.4568
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.0233 | Median: 0.0006 | Min: -0.0115

Type: eyy-plot
 Reference Name: R_00010.tiff
 Current Name: R_00025.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
 Image Correspondences: [0 18]
 Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.4650
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.0238 | Median: 0.0012 | Min: -0.0109

Type: eyy-plot
 Reference Name: R_00010.tiff
 Current Name: R_00039.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
 Image Correspondences: [0 18]
 Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.4683
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.0227 | Median: 0.0018 | Min: -0.0098



Chapitre II : Corrélation d'image numérique : principe et application



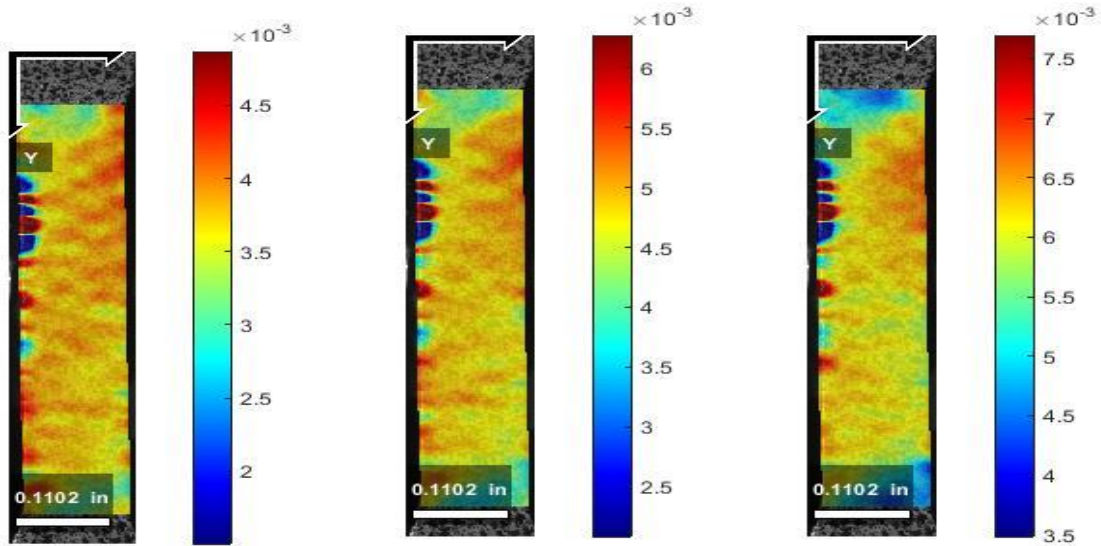
Type: eyy-plot
Reference Name: R_00010.tiff
Current Name: R_00059.tiff
Analysis type: regular
RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
Step Analysis: Disabled
RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
Image Correspondences: [0 18]
Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
Correlation Coefficient Cutoff: 0.4510
Radial Lens Distortion Coefficient: 0
Max: 0.0227 | Median: 0.0025 | Min: -0.0085

Type: eyy-plot
Reference Name: R_00010.tiff
Current Name: R_00068.tiff
Analysis type: regular
RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
Step Analysis: Disabled
RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
Image Correspondences: [0 18]
Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
Correlation Coefficient Cutoff: 0.4469
Radial Lens Distortion Coefficient: 0
Max: 0.0237 | Median: 0.0027 | Min: -0.0082

Type: eyy-plot
Reference Name: R_00010.tiff
Current Name: R_00082.tiff
Analysis type: regular
RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
Step Analysis: Disabled
RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
Image Correspondences: [0 18]
Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
Correlation Coefficient Cutoff: 0.4475
Radial Lens Distortion Coefficient: 0
Max: 0.0244 | Median: 0.0033 | Min: -0.0074



Chapitre II : Corrélation d'image numérique : principe et application



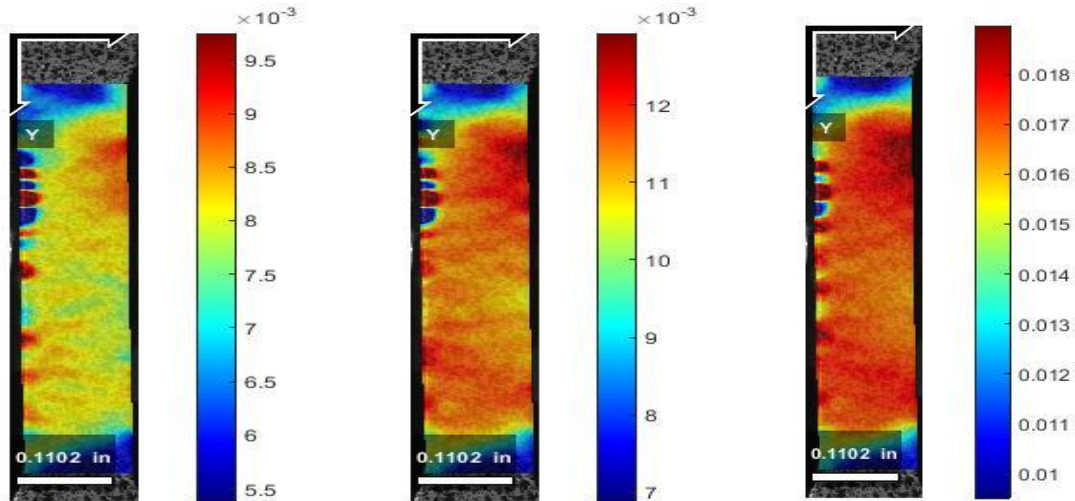
Type: eyy-plot
Reference Name: R_00010.tiff
Current Name: R_00092.tiff
Analysis type: regular
RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
Step Analysis: Disabled
RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
Image Correspondences: [0 18]
Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
Correlation Coefficient Cutoff: 0.4446
Radial Lens Distortion Coefficient: 0
Max: 0.0248 | Median: 0.0038 | Min: -0.0075

Type: eyy-plot
Reference Name: R_00010.tiff
Current Name: R_00110.tiff
Analysis type: regular
RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
Step Analysis: Disabled
RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
Image Correspondences: [0 18]
Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
Correlation Coefficient Cutoff: 0.4522
Radial Lens Distortion Coefficient: 0
Max: 0.0269 | Median: 0.0048 | Min: -0.0067

Type: eyy-plot
Reference Name: R_00010.tiff
Current Name: R_00125.tiff
Analysis type: regular
RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
Step Analysis: Disabled
RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
Image Correspondences: [0 18]
Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
Correlation Coefficient Cutoff: 0.4547
Radial Lens Distortion Coefficient: 0
Max: 0.0272 | Median: 0.0061 | Min: -0.0054



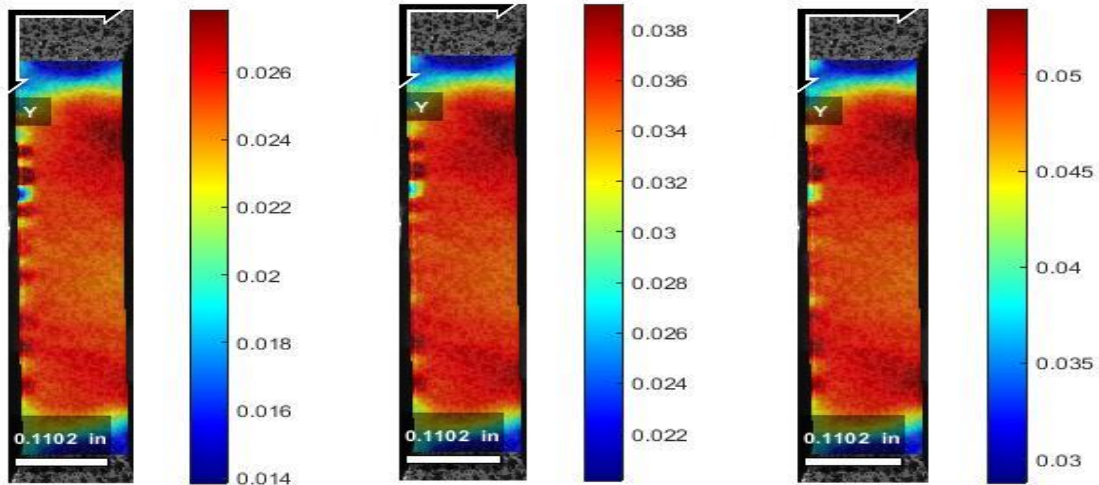
Chapitre II : Corrélation d'image numérique : principe et application



Type: eyy-plot
 Reference Name: R_00010.tiff
 Current Name: R_00144.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
 Image Correspondences: [0 18]
 Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.4605
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.0289 | Median: 0.0080 | Min: -0.0051

Type: eyy-plot
 Reference Name: R_00010.tiff
 Current Name: R_00173.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
 Image Correspondences: [0 18]
 Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.4562
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.0325 | Median: 0.0113 | Min: -0.0017

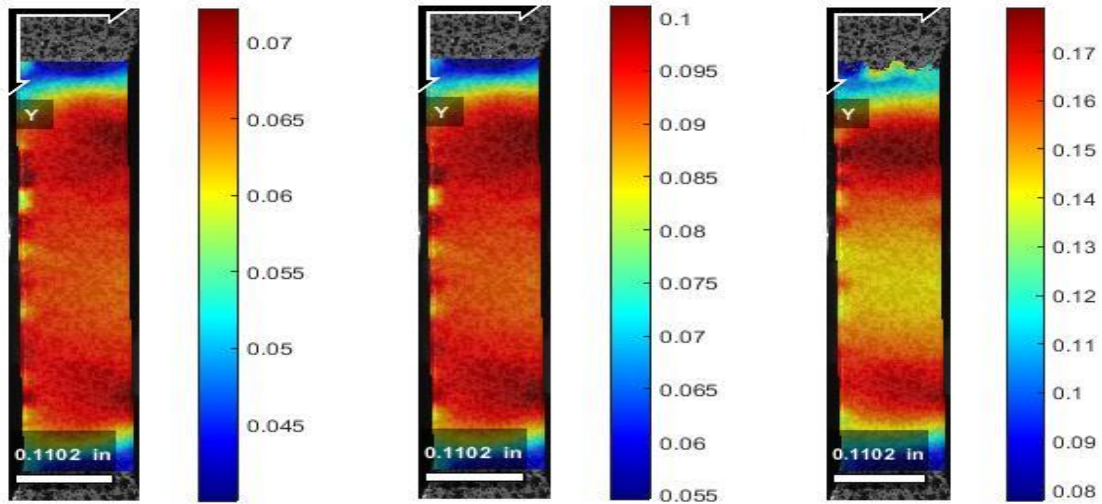
Type: eyy-plot
 Reference Name: R_00010.tiff
 Current Name: R_00216.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
 Image Correspondences: [0 18]
 Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.4333
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.0366 | Median: 0.0169 | Min: 0.0039



Type: eyy-plot
 Reference Name: R_00010.tiff
 Current Name: R_00276.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
 Image Correspondences: [0 18]
 Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.4473
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.0452 | Median: 0.0251 | Min: 0.0119

Type: eyy-plot
 Reference Name: R_00010.tiff
 Current Name: R_00351.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
 Image Correspondences: [0 18]
 Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.4462
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.0546 | Median: 0.0357 | Min: 0.0186

Type: eyy-plot
 Reference Name: R_00010.tiff
 Current Name: R_00444.tiff
 Analysis type: regular
 RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
 Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
 Step Analysis: Disabled
 RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
 Image Correspondences: [0 18]
 Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
 Correlation Coefficient Cutoff: 0.4435
 Radial Lens Distortion Coefficient: 0
 Max: 0.0691 | Median: 0.0491 | Min: 0.0263



Type: eyy-plot
Reference Name: R_00010.tiff
Current Name: R_00563.tiff
Analysis type: regular
RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
Step Analysis: Disabled
RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
Image Correspondences: [0 18]
Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
Correlation Coefficient Cutoff: 0.4536
Radial Lens Distortion Coefficient: 0
Max: 0.0898 | Median: 0.0666 | Min: 0.0365

Type: eyy-plot
Reference Name: R_00010.tiff
Current Name: R_00733.tiff
Analysis type: regular
RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
Step Analysis: Disabled
RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
Image Correspondences: [0 18]
Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
Correlation Coefficient Cutoff: 0.4716
Radial Lens Distortion Coefficient: 0
Max: 0.1246 | Median: 0.0931 | Min: 0.0499

Type: eyy-plot
Reference Name: R_00010.tiff
Current Name: R_01080.tiff
Analysis type: regular
RG-DIC Radius: 21 | Strain Radius: 15 | Subse
Diffnorm Cutoff: 1e-06 | Iteration Cutoff: 50 |
Step Analysis: Disabled
RG-DIC Subset Truncation: Disabled | Strain S
Image Correspondences: [0 18]
Units/pixels: 0.00063335 in/pixels
Correlation Coefficient Cutoff: 1.8120
Radial Lens Distortion Coefficient: 0
Max: 0.2004 | Median: 0.1515 | Min: -0.4619

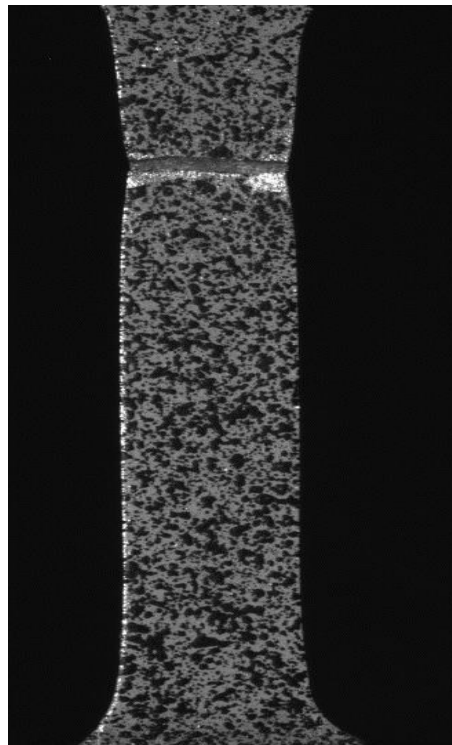


Figure II.20: Éprouvette (02) après la rupture



Références Bibliographiques

- [1] Application Of Digital-Image-Correlation Techniques In Analysing Cracked Cylindrical Pipes, Shih-Heng Tung^{1,*} And Chung-Huan Sui², National University Of Kaohsiung, Kaohsiung 811, Taiwan, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan.
- [2] On The Use Of Digital Image Correlation To Analyze The Mechanical Properties Of Brittle Matrix Composites, François Hild, Jean-Noël Périé, Université Paris 6, Jacques Lamon And Matthieupuyo-Pain, Université Bordeaux.
- [3] Digital Image Correlation, Prof K.Ramesh Digital Photo-Mechanics Laboratory , Iit Madras, India.
- [4] In-Plane Strain Measurement By Digital Image Correlation, Po-Chih Hung And A. S. Voloshin, Lehigh University.

Chapitre III

Corrosion de l'aluminium et ses alliages



Les premiers essais de corrosion connus sur l'aluminium ont commencé vers 1890, à partir du moment où ce métal fut disponible en quantité suffisante pour envisager des applications dans le bâtiment et dans les appareils de cuisine. C'est ainsi que les premiers essais de tenue à l'eau de pluie, au contact de plusieurs liquides alimentaires : bière, café, thé, furent entrepris dès le début de la décennie 1890 [1]. L'aluminium ne se corrodé pas d'une manière spécifique, mais sous diverses formes suivant des facteurs inhérents au métal (éléments d'alliages) et au milieu, lors de son utilisation [2]. Les différentes formes de corrosion peuvent apparaître sur un diagramme expérimental obtenu par mesure de chaque type de potentiel (corrosion, piqûration, passivation) en fonction du pH [3]. Le diagramme de Pourbaix du potentiel E en fonction du pH est tracé pour un équilibre aluminium/eau [4], et n'est donc pas représentatif des phénomènes apparaissant en milieu chloruré.

1. Diagrammes d'équilibre électrochimique de Pourbaix

Les diagrammes de Pourbaix sont constitués de plusieurs domaines de trois états possibles :

- Corrosion, s'il existe un produit de corrosion soluble. Pourbaix a fixé comme limite inférieure la concentration de 10^{-6} M (soit 0,027 mg. l⁻¹ pour l'aluminium) à partir de laquelle on peut considérer qu'il y a corrosion du métal. Sur la plupart de ces diagrammes les seuils supérieurs de concentration : 10^5 , 10^{-4} , 10^{-3} M, sont aussi indiqués ;
- Passivation, si le métal peut se recouvrir d'un oxyde ou hydroxyde insoluble ;
- Immunité, s'il est dans des conditions pour lesquelles il ne peut pas être corrodé (la concentration des ions M^{n+} est $< 10^{-6}$ M).

2. Diagramme E-pH de l'aluminium

Le diagramme E-pH de l'aluminium figure I.5 illustre bien la propriété amphotère du métal, il est attaqué en milieu acide avec formation d' Al^{3+} , et en milieu alcalin avec formation d'aluminates AlO_2^- [4]. Il faut noter qu'il s'agit de diagrammes d'équilibre qui permettent de déterminer les espèces stables, leur corrosion, le domaine de stabilité et le sens des réactions possibles. Ils ne permettent pas de prévoir la vitesse éventuelle. La portée de ces diagrammes est restreinte par le fait qu'ils sont tracés dans un liquide « idéal », l'eau chimiquement pure, à 25°C, pour un métal aussi pur que possible, jamais pour un alliage. Ils



ne tiennent pas compte de la présence éventuelle de chlorures dont le rôle est important dans la corrosion par piqûres, ni de la nature de l'acide et de la base qui modifie le pH. Ils n'indiquent pas les risques de corrosion « cathodique » dans les domaines d'immunité quand le potentiel est très électronégatif. Cela tient à la méthode qui est basée sur des données thermodynamiques et non sur des données cinétiques [5].

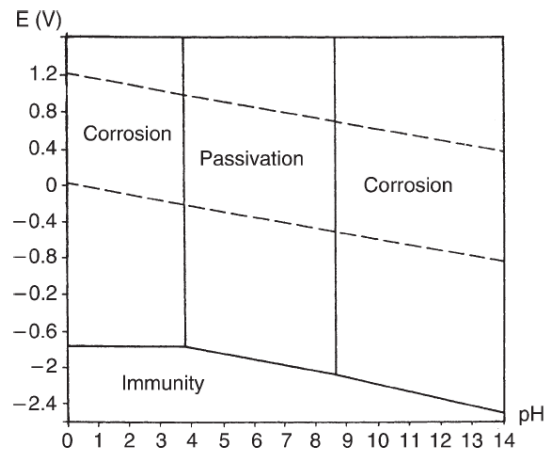


Figure III.1: Diagramme de Pourbaix E – pH de l'aluminium [2, 4]

3. Formes de corrosion d'aluminium

La corrosion de l'aluminium peut se manifester sous plusieurs formes plus ou moins visibles à l'œil nu : corrosion généralisée ou uniforme, corrosion par piqûres, corrosion sous contrainte etc. La prédominance d'une forme de corrosion dépendra d'un certain nombre de facteurs inhérents au métal, au milieu et aux conditions d'emploi. Il n'y a pas de forme de corrosion spécifique de l'aluminium et de ses alliages.

3.1. Corrosion uniforme

Ce type de corrosion se développe sous forme de micro piqûres de très petit diamètre, dans l'ordre du micromètre. Elle se traduit par une diminution continue d'épaisseur au-dessus de la surface entière du métal. On observe ce type de corrosion particulièrement dans les milieux acides ou milieux alcalins, dans lesquels la solubilité du film normal d'oxyde est haute.

Le taux de dissolution peut changer de quelques micromètres par an jusqu' à quelques micromètres par heure, selon la nature de l'acide ou de la base. Les inhibiteurs appropriés peuvent la réduire. Comme exemple, le silicate de soude réduit considérablement le taux de dissolution d'aluminium dans des milieux alcalins. Le taux de corrosion uniforme peut être



facilement déterminé en mesurant la perte de masse, ou la quantité d'hydrogène libéré [6]. C'est une donnée utile pour évaluer le taux de dissolution d'aluminium dans un bain de décapage.

3.2. Corrosion par piqûres

Comme tous les métaux passifs, l'aluminium est sensible à la corrosion par piqûre dans les milieux aqueux proches de la neutralité. La corrosion par piqûre dépend alors plus de la quantité d'anions dans l'eau que des variations de pH.

3.2.1. Généralités

La piqûration est un phénomène de corrosion qui survient lorsqu'une pièce est protégée contre la corrosion généralisée (par exemple, acier inoxydable ou aluminium). Il s'agit d'une corrosion localisée. En surface, on ne voit qu'un petit point, mais en dessous, il y a une cavité bien plus importante. Ceci entraîne à terme la perforation de la pièce et sa fragilisation.

3.2.2. Phénomène pour l'aluminium

Le potentiel de piqûre des alliages d'aluminium est en règle générale extrêmement bas. Il est ainsi très rare de pouvoir empêcher toute apparition de piqûre sur un alliage d'aluminium. La figure suivante présente un schéma simplifié de la corrosion par piqûre d'un alliage d'aluminium.

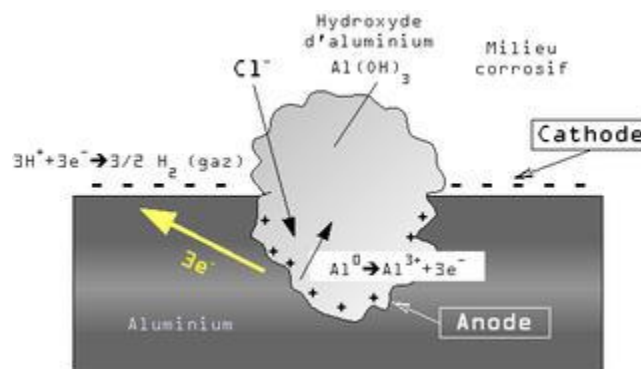


Figure III.2: Mécanisme de la corrosion par piqûres de l'aluminium [7]

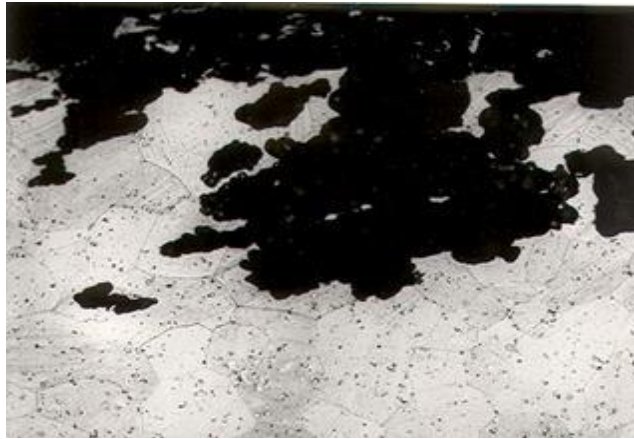
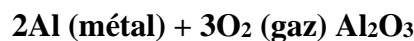


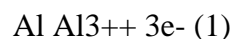
Figure III.3: Coupe d'une piqûre sur un alliage d'aluminium type 2000, microscope optique, grossissement $\times 200$) [8]

L'aluminium est naturellement recouvert d'une couche de protection, ou couche de passivation. Il s'agit d'une couche d'oxyde formée suivant la réaction :

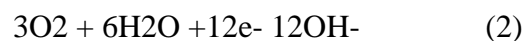


La très forte réactivité de l'aluminium est due à une valeur élevée de l'énergie libre (-1675 kJ). La piqûration est provoquée par la rupture du film d'oxyde dans un milieu contenant par exemple des ions chlorure (Cl^-). La piqûration est influencée par le milieu dans lequel se trouve l'aluminium. La composition de l'alliage peut également rentrer en ligne de compte. La présence de cuivre dans l'alliage peut par exemple être une cause de piqûration. Cependant, le milieu extérieur est le facteur dominant [9].

Après la rupture du film protecteur, l'aluminium nu devient une anode où se produit la réaction d'oxydation suivante :



Sur la cathode, au niveau de la surface de métal, nous avons les réactions suivantes :



Globalement, l'aluminium métal se dissout pour former de l'hydroxyde d'aluminium suivant la Réaction :



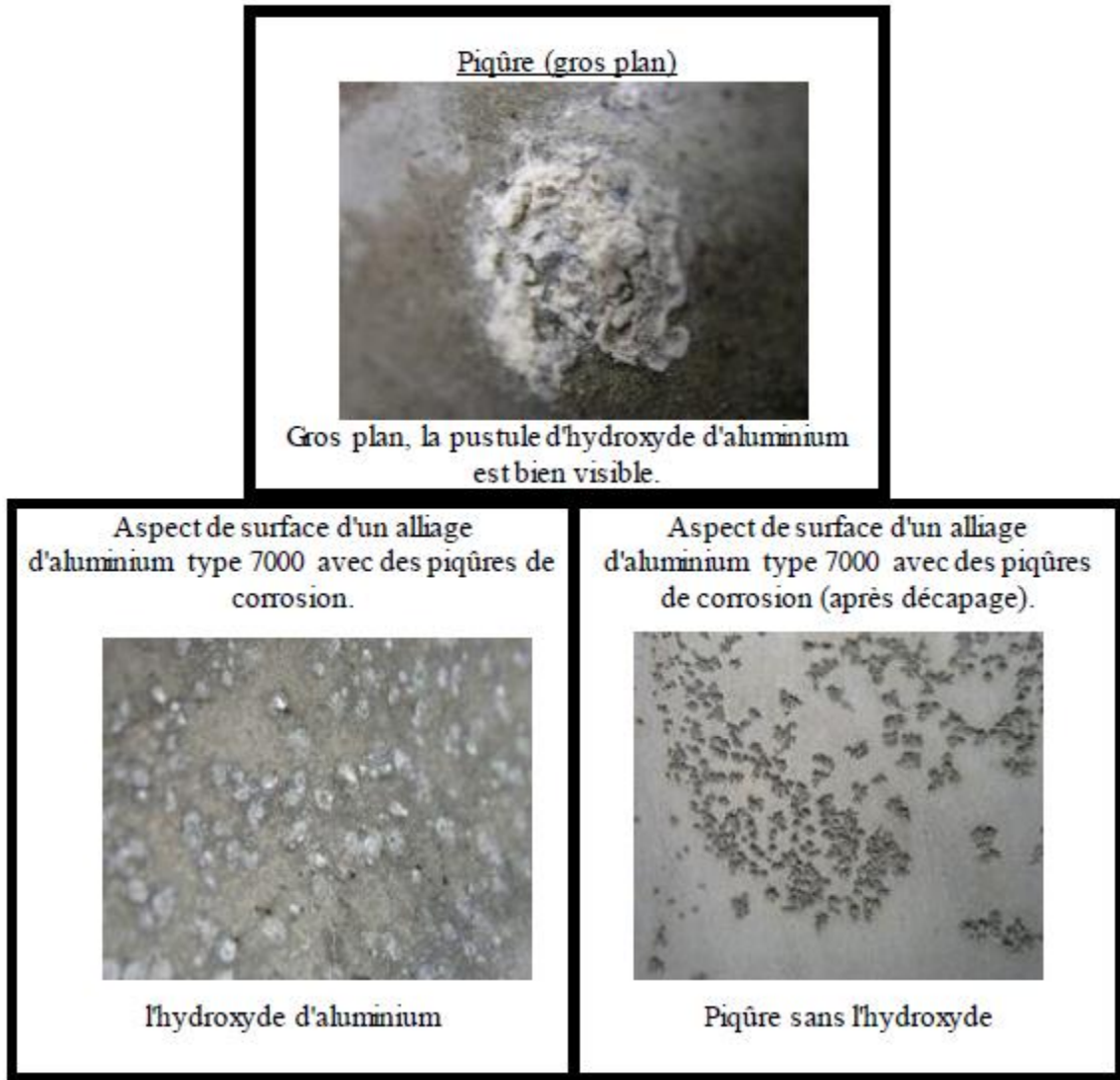


Figure III.4: Aspects de surface d'un alliage d'aluminium avec des piqûres

3.2.3. Corrosion galvanique

L'aluminium étant anodique par rapport à la plupart des métaux usuels, il est habituellement la victime dans des assemblages mixtes. L'aspect de la corrosion galvanique de l'aluminium est très caractéristique. Elle n'est pas dispersée comme la corrosion par piqûres mais, au contraire, très localisée dans la zone de contact avec l'autre métal. L'attaque de l'aluminium est régulière, et progresse en profondeur sous forme de cavernes plus ou moins arrondie. La zone affectée par la corrosion galvanique est souvent plus brillante que le reste de la surface [10, 11]. L'intensité de la corrosion galvanique de l'aluminium est d'autant plus forte que la conductivité de l'eau (ou sa salinité) est plus élevée. En d'autres termes, la corrosion galvanique est plus importante dans l'eau de mer que dans l'eau distillée. Tous les alliages d'aluminium peuvent subir de la même manière une corrosion galvanique.

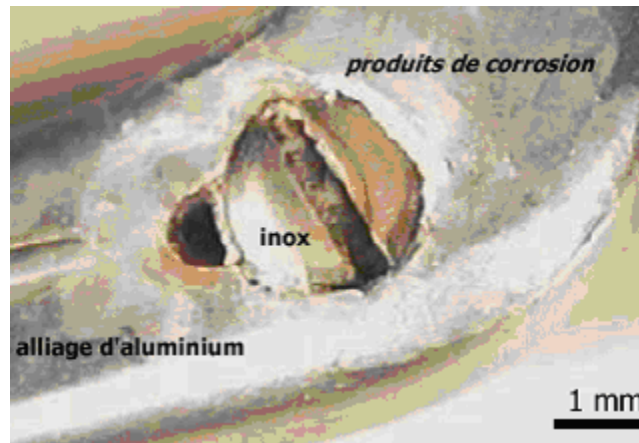


Figure III.5: Exemple caractéristique d'une corrosion d'un alliage d'aluminium par un couplage galvanique avec un acier inoxydable (une vis)

3.2.4. Corrosion caverneuse

Pour les alliages d'aluminium, la corrosion caverneuse est essentiellement une manifestation particulière de la corrosion par piqûres. L'acidification du milieu corrosif emprisonné dans une caverne interdit en effet, dans ce cas, la répartition homogène des piqûres, et concentre ainsi en un seul point la pénétration de la corrosion. Les alliages dénués de cuivre sont en pratique relativement assez résistants à cette forme de corrosion [12].

3.2.5. Corrosion inter granulaire

Ce mode de corrosion résulte de la présence, aux joints de grains, d'une phase continue et anodique par rapport au cœur du grain. Cette phase peut être due à la présence de précipités inter granulaires anodiques comme les précipités Al_3Mg_2 présents dans les alliages de la série 5XXX ou à un appauvrissement d'éléments nobles à la périphérie du grain [13]. La corrosion inter granulaire se résume alors à un couplage galvanique entre le cœur du grain et la zone anodique. Elle apparaît lorsque la différence entre les potentiels des deux phases est d'au moins 50 à 100 mV ; le potentiel global de l'alliage est alors compris entre les potentiels des deux phases. Si le potentiel de l'échantillon est supérieur à celui de la phase la plus noble, il y a coexistence des phénomènes de corrosion inter granulaire et de corrosion par piqûre [13].



4. Influence des éléments d'alliages sur la corrosion de l'aluminium

Le comportement électrochimique de l'alliage (caractère passiva blé, sensibilité à la corrosion localisée, etc.) est souvent attribué à l'aluminium [14]. Cependant la tenue à la corrosion des alliages d'aluminium est classifiée en fonction des éléments additionnés au métal. La formation de particules intermétalliques ou la ségrégation de secondes phases dans l'alliage matriciel ou autour des fibres (cas du silicium) sont responsables, soit d'une dégradation accélérée de l'aluminium, soit, au contraire, d'un ralentissement de la cinétique de corrosion du matériau. Ainsi la figure 1-5 présente schématiquement la baisse de la résistance à la corrosion d'échantillons d'aluminium en milieu chloruré en fonction de la série. Toutefois il est à noter que cet effet défavorable s'accompagne de propriétés mécaniques accrues [15].

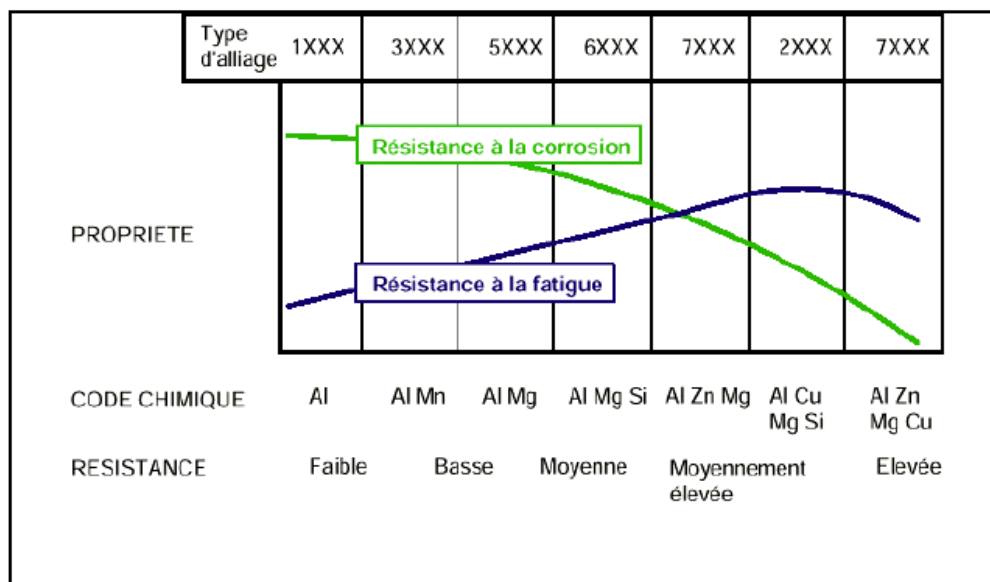


Figure III.6: Effet des éléments d'addition sur la résistance à la corrosion et à la fatigue des alliages d'aluminium. [7]

Depuis le début du XXe siècle, de nombreuses études ont porté sur l'influence de la plupart des éléments chimiques sur les propriétés, notamment de corrosion, de l'aluminium. Différents tests ont été mis en place pour mesurer l'importance relative de chacun : observation des états de surface géométrique et physico-chimique de l'alliage, détermination de la localisation des zones corrodées (joints de grains, etc.), mesure de perte de masse dans un électrolyte, mesure du potentiel de corrosion de l'alliage, effet du pourcentage d'un élément ajouté sur le potentiel de corrosion de l'aluminium pur. Ces études ont permis d'établir un



classement qualitatif de la résistance à la corrosion d'un alliage en fonction de la nature de ses constituants minoritaires et des impuretés d'élaboration, comme le fer tableau III.1 [7].

		Particule intermétallique / Seconde phase	E_{CORR} (mV _{ECS})
particules cathodiques	}	Si	-170
		Al ₃ Ni	-430
		Al ₂ Cu	-440
		Al ₃ Fe	-470
		Al ₆ Mn	-760
particules anodiques	}	Al	-840
		Al ₂ CuMg	-910
		MgZn ₂	-960
		Al ₃ Mg ₂	-1150
		Mg ₂ Si	-1190
		Al ₃ Mg ₃	-1240

Tableau III.1: Classement des alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la corrosion formes de corrosion généralement observées dans ces alliages.

Les alliages au magnésium ont une excellente tenue à la corrosion marine. Ils sont utilisés dans l'accastillage [7]. Le manganèse (série 3000) a pour effet d'améliorer les caractéristiques mécaniques et la résistance à la corrosion [9].

Du point de vue des propriétés électrochimiques bénéfiques il peut être retenu d'une manière générale que les éléments Cr, Mg, Mn apportent un effet bénéfique, tandis que les éléments Cu, Fe, Ni, Sn, Pb, Co sont néfastes. Si, Ti, Zn, Sb, Cd, Zr sont sans effet [14].

Les éléments d'alliages existent sous deux formes dans l'aluminium :

- En solution solide, suivant leur solubilité dans le métal.
- En précipités intermétalliques avec les autres éléments présents dans le métal.

Dans ce dernier cas les particules intermétalliques ont un comportement plus ou moins noble par rapport à l'aluminium, selon leur composition tableau 2 La corrosion des alliages est fortement liée aux potentiels de corrosion de ces composés, car ils sont une source de micro galvanisme (micro piles) et influent sur la piqûration de l'aluminium (attaque localisée) [14]. La mesure des potentiels de corrosion des particules intermétalliques est cependant difficile en raison de leur petite taille (<100 µm).



Série	Eléments d'alliage	Particules Intermétalliques ou secondes phases	Formes de corrosion généralement observées
5000	Mg	Al_3Mg_2 , Al_3Mg_5	Piqûres, généralisée, sous contrainte (pour les forts taux en magnésium)
1000	Aucun	Al_3Fe , Al_6Fe $Al_{12}Fe_3Si_2$	Piqûres, généralisée dépend de la quantité de secondes phases
6000	Si, Mg	$FeSiAl_3$, Fe_2SiAl_8 $Al_8Si_6Mg_3Fe$, Mg_2Si	Piqûres, généralisée
3000	Mn	Al_6Mn , Al_6MnFe	Piqûres, généralisée
4000	Si	Si	
7000	Zn, Mg Ajout de Cu	$MgZn_2$	Piqûres, généralisée, sous contrainte, feuilletante, intergranulaire (avec Cu)
2000	Cu	$CuFeMnAl_6$, Al_2Cu Al_2CuMg	Piqûres, généralisée, sous contrainte (sans traitement thermique), intergranulaire, feuilletante

Tableau III.2: Potentiel de corrosion de quelques particules intermétalliques. [7]

Dans les alliages à base de magnésium et/ou de silicium (précipités intermétalliques anodiques), dont le potentiel de corrosion est plus faible que celui de l'aluminium, les précipités d' Al_3Mg_2 et de Mg_3Si sont plus corrodables que la matrice. Leur dissolution aux joints de grains confère aux alliages des séries 5000 et 6000 une meilleure résistance à la corrosion que les alliages contenant des particules cathodiques.

L'addition d'éléments d'alliage modifie ainsi fortement le potentiel de corrosion dans le sens anodique ou cathodique [15]. Pour chacun, les principales variations sont fonction de la teneur de l'élément dans l'alliage figure III.7.

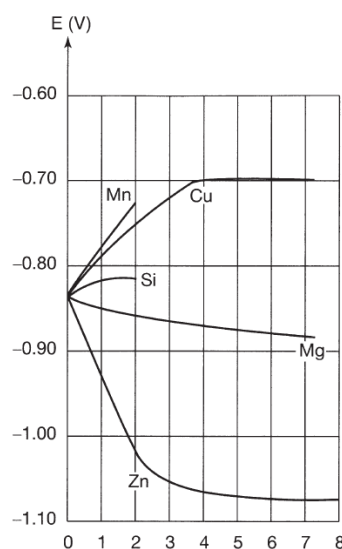


Figure III.7 : Evolution du potentiel de corrosion de l'aluminium en fonction de l'enrichissement en éléments d'addition. [7]



Ce sont les alliages au cuivre de la famille 2000 qui ont les potentiels de dissolution les moins électronégatifs. Les alliages au zinc de la famille 7000 ont les potentiels les plus électronégatifs. Les valeurs des potentiels de dissolution des principaux alliages peuvent varier d'un auteur à un autre de 50 à 100 mV pour un même alliage.

5. Procédure expérimentale

5.1. Matériaux

Le matériau utilisé est l'alliage d'aluminium 2024

La composition chimique est donnée dans le tableau III.3

Al%	Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Zn%	Cr%	Ni%	Ti%
90.7	0.058	0.165	4.46	0.727	>1.5	0.111	0.0029	0.0076	0.035

Tableau III.3: Composition chimique de l'alliage d'aluminium 2024.

5.2. Test de polarisation

Nous avons soumis trois échantillons avec trois différents taux de déformation au test de corrosion dans une solution de 3.5% NaCl. Dans ce qui suit, nous décrivons l'appareillage utilisé. Les résultats de corrosion pour ces trois échantillons seront aussi présentés.

5.2.1. Description et principe de fonctionnement de l'appareillage

Cette technique nécessite le matériel de laboratoire suivant :

- Un potentiostat (Autolab)
- Un micro-ordinateur (pilote par un logiciel Nova 2.0)
- Une électrode de travail (échantillon en Al)
- Une électrode de référence (calomel saturé)
- Une électrode auxiliaire (platine)

L'électrode de travail (aluminium), l'électrode de référence (calomel saturé) et l'électrode auxiliaire (platine) sont immergées dans une solution électrolytique et connectées à un potentiostat assisté par ordinateur.

Les courbes $E = f(I)$, $E = f(\log i)$, etc., sont tracées à l'aide d'un logiciel Nova 2.0. La fonction du potentiostat est de maintenir une différence de potentiel fixe entre l'électrode de



travail et l'électrode de référence en appliquant un courant variable entre l'électrode de travail et l'électrode auxiliaire.

L'électrode de référence est conçue à partir d'un matériau spécial qui, en combinaison avec l'électrolyte, maintient un potentiel stable utilisé comme point de référence pour les mesures de potentiel. On utilise généralement des électrodes au calomel. Cette électrode est placée de manière à ne pas avoir une chute de tension importante entre l'électrode de travail et l'électrode auxiliaire.

L'électrode auxiliaire est conçue à partir de matériau inerte tel que le graphite ou le platine.

La figure III.8 représente le dispositif expérimental des tests de polarisation.



Figure III.8 : Dispositif expérimental des tests de polarisation

5.2.2. Techniques de caractérisation électrochimiques

5.2.2.1. Potentiel en circuit ouvert (OCP)

Le suivi du potentiel à circuit ouvert est l'une des techniques de caractérisation de la corrosion d'un matériau donné. Cette technique permet de suivre l'évolution du potentiel d'abandon de l'électrode de travail en fonction du temps d'immersion. Dans notre travail, trois échantillons avec trois différents taux de déformation ont été choisis pour le test de corrosion. L'échantillon est donc plongé dans la solution saline préparée, il tend à se



dissoudre et à se charger électriquement avec création d'une double couche électrochimique assimilable à un condensateur électrique. Au bout d'un temps suffisamment long pour qu'un régime stationnaire soit établi, l'électrode métallique prend par rapport à la solution un potentiel, appelé potentiel de corrosion. Ce potentiel ne peut être connu en valeur absolue. Il est repéré par rapport à une électrode de référence [16]. Cette technique simple apporte des informations préliminaires sur la nature des processus en cours, à l'interface métal/électrolyte : corrosion, passivation, et renseigne sur l'évolution de la noblesse des échantillons. Cette mesure permet également de connaître la durée d'immersion nécessaire à l'établissement d'un régime stationnaire indispensable aux mesures potentiel dynamiques ou d'impédance électrochimique [17, 18].

5.2.2.2 Courbes de polarisation Tafel : $i = f(E)$

Le tracé des courbes de polarisation potentiodynamique, consiste à suivre la réponse en courant de l'échantillon à une rampe de potentiel permettant de le déplacer lentement de manière linéaire de son état d'équilibre. A l'aide d'un générateur extérieur et d'une contre électrode, on fait passer un courant à travers l'électrode métallique. Son état stationnaire est modifié et sa surface prend une nouvelle valeur de potentiel.

Les courbes $E = f(I)$ ou $I = f(E)$ constituent les courbes de polarisation. Ces méthodes présentent un double avantage, d'une part, elles permettent de déterminer la résistance de polarisation, et d'autre part, de déterminer le mécanisme de corrosion.

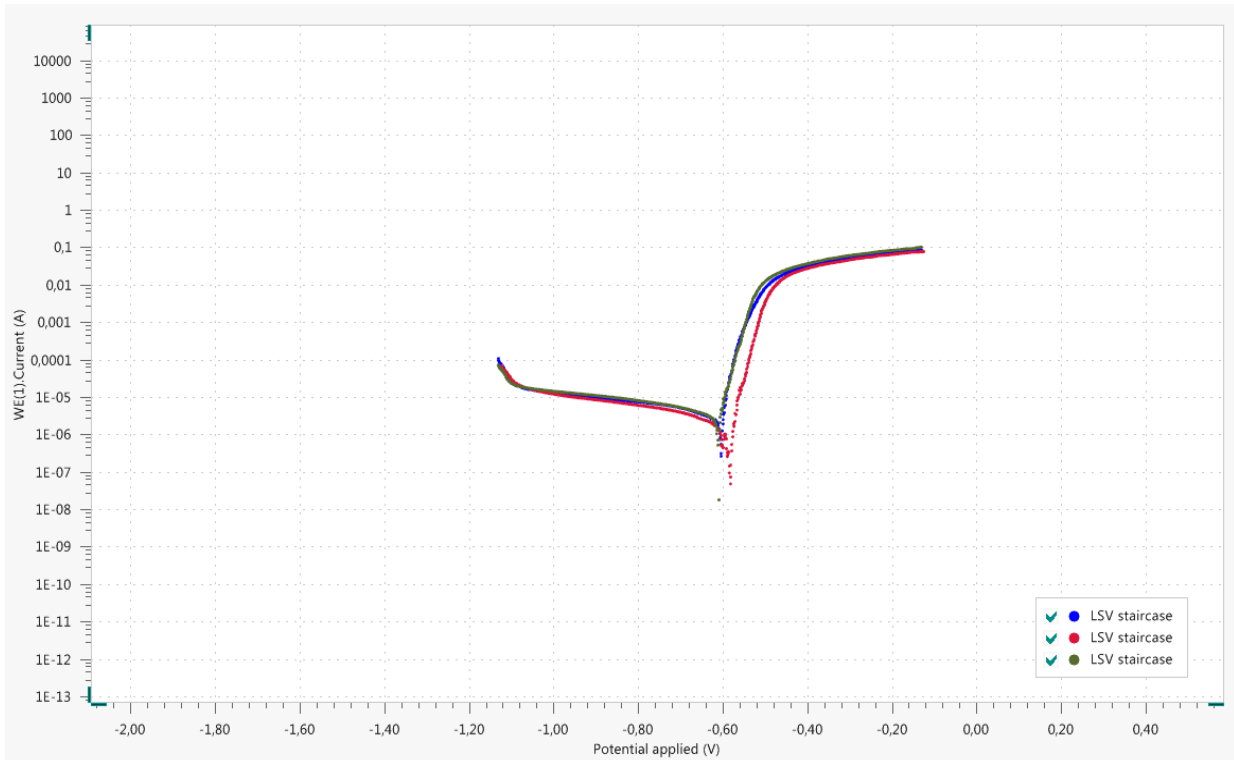


Figure III.9: Courbes de polarisation obtenues à différents taux de déformation de l'alliage d'aluminium 2024.

5.2.2.3. Paramètres électrochimiques

- La vitesse de corrosion peut être déterminée à partir de l'exploitation des courbes intensité-potentiel.
- Par construction anode et cathode peuvent être séparées et le courant de corrosion I_{corr} , intensité commune des composantes anodique et cathodique au point de courant nul, ne peut être estimé directement.

Les difficultés existantes pour un potentiel redox s'ajoutent à celles liées au fait qu' E_{corr} est un potentiel mixte. L'impossibilité de calculer I_{corr} à l'aide de la seule valeur du potentiel de corrosion conduit naturellement à exploiter la forme de la courbe courant-tension au voisinage de ce point, là où les composantes anodiques et cathodiques contribuent de manière appréciable au courant global. La 1^{ère} méthode est une méthode d'extrapolation, la 2^{ème} une méthode locale. Toutes deux reposent sur une forme analytique des relations élémentaires $I = f(E)$: la loi de Tafel. [09]



	Déformation 30%	Déformation 40%	Déformation 50%
ba (V/dec)	0.02885	0.32046	0.024648
bc (V/dec)	0.4038	0.02518	0.45587
Ecorr, Calc (V)	-0.60566	-0.58306	-0.60806
Ecorr, Obs (V)	-0.60452	-0.58292	-0.61069
Jcorr (A/cm²)	2.9458 ^E -06	1.6439 ^E -06	3.3283 ^E -06
Icorr (A)	2.9458 ^E -06	1.6439 ^E -06	3.3283 ^E -06
Corrosion rate (mm/year)	0.03423	0.019102	0.038675
Polarisation résistance (Ω)	2927.6	6167.6	3051.1
E Begin (V)	-0.76736	-0.75958	-0.77728
E End (V)	-0.54519	-0.53741	-0.55511

Tableau III.4: Paramètres électrochimiques de l'alliage d'aluminium 2024.

La corrosion est un phénomène complexe, parfois difficile à expliquer. Il n'y a pas une corrosion mais plusieurs formes de corrosion possible pour un métal. La tenue à la corrosion d'un métal ou d'un alliage dépend de nombreux facteurs inséparables au métal lui-même, au milieu dans lequel il est placé et aux conditions d'emploi. Il n'y a pas de métal ou alliage capable de résister à tous les milieux aqueux, même à la température ambiante. La corrosion de l'aluminium peut se manifester sous plusieurs formes plus ou moins visibles à l'œil nu. Il n'y a pas de forme de corrosion spécifique de l'aluminium et de ses alliages. L'aluminium est un métal passif, donc sujet à la corrosion localisée. Aux moyens de protection très répandus (traitements de surface : action sur le matériau) s'ajoute actuellement des investigations sur l'emploi d'inhibiteurs (actions sur le milieu). En matière de protection contre la corrosion, il est possible d'agir sur le matériau lui-même (choix judicieux, formes adaptées, contraintes en fonction des applications, etc.), sur la surface du matériau (revêtement, peinture, tout type de traitement de surface, etc.) ou sur l'environnement avec lequel le matériau est en contact (inhibiteur de corrosion).



Références bibliographiques

- [1] Gimenez, P., Rameau, J. J. et al, Corrosion, 37, 12, pp. 673-682, 1981.
- [2] LuminitaDin-Stirbu, E., Thèse de Doctorat, Comportement à la Corrosion desAlliages d'Aluminium Utilisés dans l'Industrie Automobile pour la Fabrication deRadiateur Chauffage, Génie des Matériaux, Université de Pitesti (Roumanie), p15, 2005.
- [3] Deltombe, E., Pourbaix, M. Comportement Electrochimique de l'Aluminium,Diagramme d'Equilibre Tension/ pH du Système Al-H₂O à 25°C, Rapport TechniqueN°42, Cebelcor, Décembre 1956.
- [4] Scully, J.C., The Fundamentals of Corrosion, International Series of Monographs onMaterials Science and Technology, 2nd Ed. Pergamon International, Oxford, Vol. 17, 1975.
- [5] Reboul, M. C., Warner, T. J. et al, Corrosion Reviews, 15, pp.3-4, 471-496, 1997.
- [6] Classe de PTSI, Matériaux, Lycée Vauban, Brest 1992.
- [7] Vargel, C. Corrosion de l'aluminium, Edition. Dunod, ISBN 2-10-006569-6, 2002.
- [8] Mazille,H., Beranger, G., Corrosion des Métaux et Alliages., Mécanismes etPhénomènes. Paris, Ed Lavoisier, p 405. ISBN 2-7462-0466-5, 2003.
- [9] Guillaumin, V., Mankowski, G., Localised Corrosion of 6056T6 Aluminium Alloy inChloride Media. Corrosion Science, Vol. 42, pp.105-125, 2000.
- [10] Wood J., Harris D.A., Revue de l'Aluminium, les Alliages de Fonderie Inoxydables. p.882-893, 1968.
- [11] Develay, R., Importance de l'Addition de Manganèse dans l'Aluminium et les Alliagesde l'Aluminium, Revue de l'Aluminium. p.345-368, 1978.
- [12] Altenpohl, D., Aluminium Viewed From Within, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, ISBN3-87017-138-3, 1982.
- [13] Smith, C.A., The Corrosion Story, Zinc, Lead and Aluminum, Anti-Corrosion, Part 3,Vol. 24, pp.13-15, 1977.
- [14] Ketcham, S.J., Shaffer, I.S., Exfoliation Corrosion of Aluminum Alloys, ASTM, STP 516, pp.3-16, 1972.
- [15] Triki, E. Phénomènes de la corrosion, Première Ecole Maghrébine de Corrosion, Hammamet, 1990.



[16] Assouli, B. (2002). Etude par émission acoustique associée aux méthodes Electrochimiques de la corrosion et de la protection de l'alliage cuivre-zinc (60/40) en milieux neutre et alcalin. INPT, France.

[17] Payan, S. (2001). Comportement à la corrosion galvanique de matériaux composites à matrice d'alliage d'aluminium renforcée par des fibres de carbone haut-module (Doctoral Dissertation, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I).

[18] Hernandez, L. S., Garcia, G., Romagnoli, R., & Del Amo, B. (1998, March). Evaluation of Non-Toxic Alkyd Primers by Electrochemical Impedance Spectroscopy. In CORROSION 98. OnePetro.



Conclusion

En conclusion, il est nécessaire de citer les limites et les exigences pratiques lors de l'utilisation de la technique DIC. En effet, même si le système expérimental est simple, les conditions doivent être contrôlées avec attention pour obtenir une bonne précision de mesure. Un mauvais parallélisme entre la surface étudiée et le plan de l'image de l'appareil photo, ou une non-homogénéité de l'éclairage, par exemple, peuvent avoir des effets néfastes lors de la mesure. De plus, dans certaines zones, que l'on qualifie de frontières, la corrélation ne permet pas d'obtenir des mesures précises. Ces frontières peuvent représenter, à la fois les frontières initiales de l'échantillon / ses bords, mais également des frontières apparaissant au cours de la transformation des fissures. Dans ces zones, plusieurs phénomènes, liés par exemple aux discontinuités du champ de déplacement et aux pixels issus du fond de l'image, perturbent significativement la mesure.