

*République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A.MIRA - BEJAIA*



*Faculté des Sciences Exactes  
Département de PHYSIQUE*

## *Mémoire de Master*

*Présenté par*

*M<sup>elle</sup> AYAD Samira*

*Spécialité: Physique des Matériaux*

*Thème*

*Apport de la thermographie infrarouge dans la  
caractérisation de la déformation des matériaux métalliques*

*Soutenu le 24/09/2020*

*Devant le jury composé de MM.*

<i>SOUICI</i>	<i>Abdelhafid</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>
<i>BOUFALA</i>	<i>Khaled</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>
<i>AIT AMOKHTAR</i>	<i>Hakim</i>	<i>Professeur</i>	<i>Rapporteur</i>

**Année Universitaire : 2019/2020**

## *Remerciements*

*Je tiens à remercier vivement mon encadreur le Professeur H.Ait Amokhtar pour son appui Scientifique et ses judicieux conseils.*

*Je suis extrêmement reconnaissant envers ma famille, qui m'a toujours soutenu durant ma Scolarité.*

*Ce travail n'aurait pu aboutir sans le soutien de toute ma famille ma d'une façon exceptionnelle ma mère, mon père, mes grands-pères et grands-mères, mes frère Boubaker et Imad, et ma sœur soumia, je remercie en particulier la famille Gana.*

*Je remercie les membres de jury, monsieur BOUFAL.AKH pour sa présence très appréciée en tant qu'examinateur et monsieur SOUICI.A pour avoir accepté de participer à ce jury de ce mémoire en tant que président.*

*Je remercie aussi tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## Dédicace

*J'en fais une dédicace à mes très chers parents.*

*À mes frères et ma sœur*

*À mes grands-parents.*

*À tous les membres de ma famille.*

*À toutes mes chères amies et à tous mes chers amis.*

*À tous mes enseignants.*

*À tous ceux que j'aime.*

*À tous ceux qui m'aiment.*

*À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

---

# Sommaire

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Déformation plastique des matériaux métalliques</b>	
I.1. Introduction .....	2
I.2. Contraintes et déformations .....	2
I.2.1. Essai de traction .....	2
I.2.2. Etat de contrainte .....	4
I.2.3. Etat de déformation .....	5
I.3. Microstructure des matériaux métalliques .....	6
I.3.1. Métaux purs .....	6
I.3.2. Alliages métalliques .....	7
I.4. Dislocations et déformation plastique .....	8
I.4.1. Dislocations .....	8
I.4.2. Vecteur de Burgers et types de dislocations.....	10
I.4.3. Mouvement des dislocations .....	11
I.4.4. Facteur de Schmid .....	14
I.4.5. Interactions des dislocations .....	14
I.4.5.1. Source de Frank et Read .....	15
I.4.5.2. Interaction entre dislocations .....	15
I.4.5.3. Interaction dislocations – joints de grain .....	15
I.5. Effets de la vitesse de déformation et de la température .....	17
<b>Chapitre II : Méthodes physiques d’analyse des déformations</b>	
II.1. Méthodes mécaniques .....	19
II.1.1. Machine de traction .....	19
II.1.2. Jauges de déformation (extensomètres à fils résistants) .....	19
II.1.3. Extensomètres .....	20
II.2. Méthodes optiques indirectes .....	20
II.2.1. Méthode de moiré .....	20
II.2.2. Interférométrie holographique .....	21

II.2.3. Interférométrie speckle (granularité laser) .....	22
II.2.4. Shearographie .....	23
II.3. Les méthodes optiques directes .....	23
II.3.1. Mesure des variations des caractéristiques géométriques d'un réseau .....	23
II.3.2. Méthode de corrélation d'images .....	24
II.3.3. La thermographie infrarouge .....	25
II.4. Analyse des déformations à l'aide de la thermographie infrarouge .....	26
II.4.1. Présentation de la méthode de la thermographie infrarouge .....	26
II.4.2. Quelques principes et lois physiques .....	27
II.4.2.1. Modes de transfert de la chaleur .....	27
II.4.2.2. Le corps noir .....	27
II.4.2.3. Emissivité (facteur d'émission) .....	30
II.4.2.4. Equation de la chaleur (Equation fondamentale de la conduction thermique) .....	31
II.4.3. Utilisation d'une caméra infrarouge .....	32
II.4.3.1. Image thermique (thermo gramme) .....	32
II.4.3.2. Les détecteurs .....	32
II.4.3.3. Problèmes rencontrés .....	33
II.4.4. Description et mode de fonctionnement du dispositif de thermographie .....	34
II.4.5. Etalonnage d'une caméra thermique .....	34
II.5. Conclusion .....	35

## Chapitre III : Analyse d'un essai de traction à l'aide de la thermographie infrarouge

III.1. Introduction.....	36
III.2. Conditions expérimentales .....	36
III.3. Courbe de traction et caractéristiques mécaniques .....	36
III.3.1. Courbe de traction .....	36
III.3.2. Caractéristiques mécaniques .....	37
III.4. Apport de la thermographie infrarouge dans l'analyse de l'aspect spatial de la déformation .....	39
III.4.1. Champs de température et comportement mécanique .....	39

III.4.2. Comportement local .....	41
III.5. Conclusion .....	43
Conclusion générale .....	44
Références Bibliographiques .....	45

# Liste des figures

## Chapitre I

<b>Figure I.1.</b> (a) Schéma d'une éprouvette soumise à une force de traction $F$ , (b) machine de traction .....	3
<b>Figure I.2.</b> Courbe de traction contrainte-déformation .....	3
<b>Figure I.3.</b> Définition des composantes du tenseur des contraintes autour d'un point $O$ .....	5
<b>Figure I.4.</b> Schéma permettant de définir le tenseur des déformations. (a) solide non déformé, (b) solide déformé .....	5
<b>Figure I.5.</b> Joints de grains d'un métal pur observés au microscope optique en lumière réfléchie .....	6
<b>Figure I.6.</b> (a) Cristallisation d'un métal et formation des grains par nucléation hétérogène, (b) représentation schématique d'une dendrite en formation dans un métal pendant la solidification .....	7
<b>Figure I.7.</b> Microstructures des alliages métalliques: (a) dendrites, (b) eutectique lamellaire, (c) dendrites et eutectique inter dendritique, (d) précipités formés à l'état solide à l'intérieur des grains .....	7
<b>Figure I.8 :</b> Dislocation coin .....	8
<b>Figure I.9 :</b> Dislocation vis .....	9
<b>Figure I.10 :</b> Image en MET montrant des dislocations dans le quartz .....	9
<b>Figure I.11 :</b> Formation de cellule de dislocation .....	9
<b>Figure I.12:</b> Circuit de Burgers et vecteur de Burgers. (a) Circuit dans un cristal parfait, (b) circuit autour d'une dislocation coin et (c) circuit autour d'une dislocation vis .....	10
<b>Figure I.13.</b> Dislocation présentant des portions de différents types .....	10
<b>Figure I.14.</b> Déplacement d'une dislocation coin sous l'action d'une contrainte .....	12
<b>Figure I.15.</b> Mouvement des dislocations .....	12
<b>Figure I.16.</b> Lignes et bandes de glissement sur une éprouvette déformée plastiquement ....	13
<b>Figure I.17.</b> Schéma illustrant la Loi de Schmid .....	14
<b>Figure I.18.</b> Source de Frank et Read .....	15
<b>Figure I.19 :</b> Dislocations de signes opposés se déplacent dans des sens opposés .....	16

**Figure I.20.** Interaction entre deux dislocations-coin parallèles (a) dislocations de mêmes signes, (b) dislocations de signes contraires, (c) Processus d'annihilation mutuelle de dislocations de signes contraires ..... 16

**Figure I.21.** (a) Courbes nominales de traction du C68 pour différentes températures à la vitesse de déformation de  $4 \times 10^2/s$ . (b) Courbes expérimentales de traction du C68 pour différentes températures à la vitesse de déformation de  $4 \times 10^2/s$  ..... 17

**Figure I.22.** Effet de la température sur la contrainte équivalente à 10% de déformation ..... 18

## Chapitre II

**Figure II.1.** Jauge de déformation ..... 20

**Figure : II.2.** Principe du phénomène de moiré. (a) Moiré de réseaux de pas voisins. (b) Moiré de réseaux de même pas inclinés entre eux ..... 21

**Figure II.3.** Principe de l'enregistrement d'un hologramme ..... 22

**Figure II.4.** Schéma d'interférométrie de speckle ..... 22

**Figure II.5.** Principe de fonctionnement de la Schéarographie ..... 23

**Figure II.6.** Déformations calculées pour des variations de longueurs de réseaux carré et cercle ..... 24

**Figure II.7.** Codage aléatoire d'une surface ..... 25

**Figure II.8.** Le spectre électromagnétique ..... 25

**Figure II.9.** Principe de la caméra infrarouge ..... 26

**Figure II.10.** Mode de transfert de chaleur ..... 27

**Figure II.11.** Émittance spectrale radiante d'un corps noir selon la loi de Planck pour différentes températures absolues ..... 28

**Figure II.12.** Courbe définie la loi de Wien ..... 30

**Figure II.13.** Principe de mesure de température sans contact ..... 32

**Figure II.14.** Principe du système de détection ..... 33



## Chapitre III

<b>Figure III.1.</b> Courbe "charge-allongement" de l'alliage Al3.2%Mg à température ambiante avec une vitesse de déformation de 126 mm/min .....	37
<b>Figure III.2.</b> Courbes de traction conventionnelle (en rouge) et rationnelle (en bleu) de l'alliage Al3.2%Mg à température ambiante et à vitesse de traction de 126 mm/min .....	38
<b>Figure III.3.</b> Champ de températures de la surface de l'éprouvette avant déformation .....	39
<b>Figure III.4.</b> Camps de température de la surface de l'éprouvette, correspondants aux 5 points indiqués par le motif "*" sur la figure III.5 .....	40
<b>Figure III.5.</b> Courbe de traction "contrainte-temps" de l'alliage Al-3.2%Mg à température ambiante avec vitesse une déformation 126 mm/min. Les motifs "*" indiquent des états de contraintes donnés auxquels sont associés les champs de températures de la figure III.4 .....	41
<b>Figure III.6.</b> Image de la surface de l'éprouvette indiquant la position des 3 points considérés: a (25,40), b (120,25) et c (200,25) .....	42
<b>Figure III.7.</b> Evolution de la température aux points a, b et c, indiqués sur l'image de la figure III.6 .....	42

# Liste des tableaux

## Chapitre 1

<b>Tableau I.1.</b> Plans et directions de glissement pour quelques métaux usuels .....	13
<b>Tableau I.2 :</b> Nombre de systèmes de glissement par structure cristalline .....	13

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Les matériaux métalliques sont largement utilisés dans différents domaines, comme l'industrie automobile, le bâtiment, ...etc. Leur réponse à des sollicitations mécaniques est principalement dictée par leurs microstructures et les conditions de leur utilisation.

Généralement, sous l'effet d'un effort mécanique croissant, un matériau métallique se déforme d'abord de façon élastique puis plastique avant de se rompre. Ce comportement typique dépend de la microstructure du matériau, des conditions de déformation et des mécanismes régissant sa déformation. Pour étudier la réponse des matériaux aux sollicitations mécaniques et déterminer leur domaine d'utilisation optimal, on fait appel aux essais mécaniques de caractérisation. Cependant, ces essais ne permettent pas une caractérisation locale. C'est pour cela qu'on fait appel aux mesures de champs de déformations et/ou thermiques.

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons à la déformation plastique des matériaux métalliques. Nous aborderons, en particulier, les mécanismes régissant la déformation plastique, c'est à dire le glissement et les interactions des dislocations. Aussi, à travers l'analyse d'un essai de traction, nous verrons l'apport de la thermographie infrarouge en science des matériaux.

Ce mémoire est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre est une revue bibliographique sur la microstructure des matériaux métalliques, les défauts cristallins, la déformation plastique, les mécanismes de déformation et le rôle des dislocations.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les différentes méthodes d'analyse des déformations. L'apport de la thermographie infrarouge, comme complément aux méthodes classiques, sera particulièrement étudié de façon plus approfondie.

Dans le troisième chapitre, nous allons analyser les résultats d'un essai de traction uni axiale. L'essai est réalisé sur un alliage d'aluminium-magnésium (Al-3.2%Mg) avec enregistrement thermique à l'aide de la thermographie infrarouge.

Le mémoire se termine avec une conclusion générale sous forme de synthèse.

# **Chapitre I**

## **Déformation plastique des matériaux métalliques**

## Chapitre I

# Déformation plastique des matériaux métalliques

### I.1. Introduction

Pour toute conception ou fabrication mécanique, le choix du matériau à utiliser est le résultat d'une combinaison de plusieurs propriétés. Pour la mise en forme homogène d'un matériau par exemple, la ductilité est l'une des propriétés mécaniques les plus recherchées. Elle caractérise la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement, de manière irréversible, sans se rompre [2].

La déformation plastique des métaux est principalement régie par le glissement des dislocations et leurs interactions avec les défauts cristallins. Dans ce chapitre, nous allons étudier la déformation plastique dans les matériaux cristallins et les mécanismes associés.

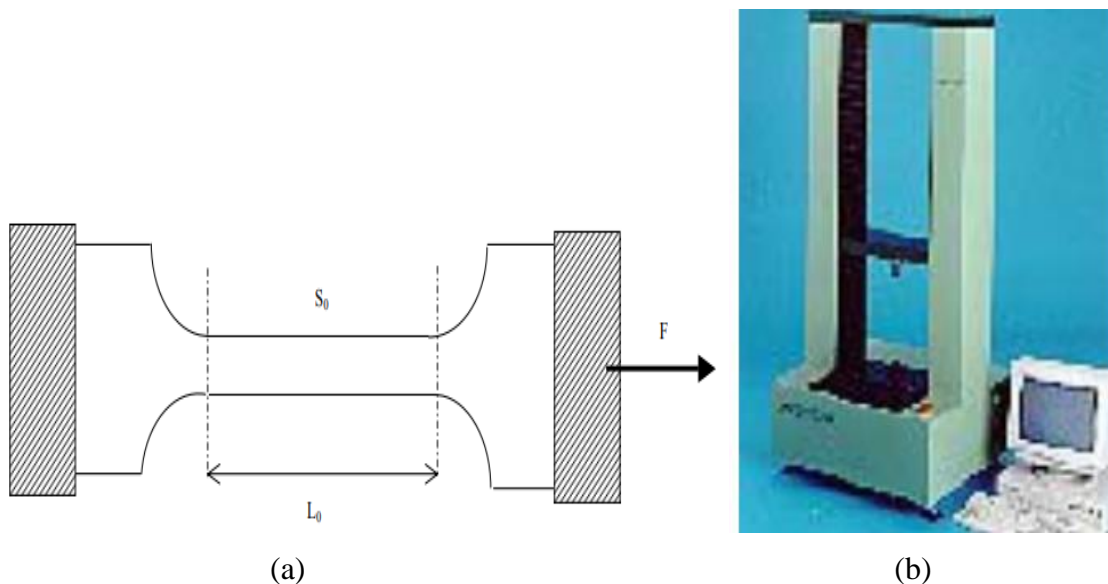
### I.2. Contraintes et déformations

Lorsqu'on applique à un matériau une contrainte mécanique croissante, il se déforme d'abord de façon élastique. C'est-à-dire le matériau revient à son état initial après la décharge. Au-delà d'une certaine limite, lorsque la contrainte appliquée est grande, il se déforme de façon plastique irréversible (le matériau ne peut pas revenir à son état initial une fois la contrainte relâchée) [1].

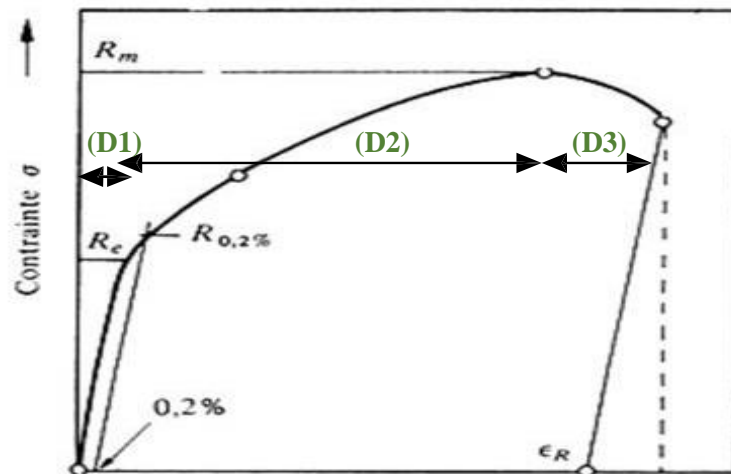
#### I.2.1. Essai de traction

L'essai de traction est l'essai le plus simple et le plus utilisé pour étudier la résistance des matériaux. A l'aide d'une machine de traction (Figure I.1), on applique une force de traction  $F$  et on mesure l'allongement correspondant  $\Delta L$  d'une éprouvette de forme cylindrique ou plate. Sur la courbe de déformation obtenue expérimentalement (Figure I.2), on distingue trois domaines:

- le domaine de déformation élastique (D1).
- le domaine de déformation plastique (D2).
- le domaine de striction-rupture (D3).



**Figure I.1.** (a) Schéma d'une éprouvette soumise à une force de traction  $F$ , (b) machine de traction [7].



**Figure I.2.** Courbe de traction contrainte-déformation [8].

- **Domaine élastique :** Le comportement du matériau est linéaire, quand on supprime la contrainte appliquée l'éprouvette revient à sa position initiale. Dans ce domaine, la déformation est proportionnelle à la contrainte, c'est la loi de Hooke [6, 9].
- **Domaine plastique :** dans ce domaine, la déformation est irréversible. Lorsqu'on supprime la contrainte on constate un retour élastique laissant une déformation plastique résiduelle. Le comportement contrainte-déformation est non linéaire [6, 9].
- **Domain de Striction-rupture:** au cours de la déformation plastique, les propriétés mécaniques changent progressivement. Aux déformations élevées, à partir d'une certaine limite  $R_m$ , la force  $F$  diminue lorsque l'allongement  $\Delta L$  augmente, c'est-à-dire que le matériau se déforme plus facilement et le système devient instable. Une striction se produit et conduit à la rupture du matériau [6,9].

Plusieurs caractéristiques mécaniques peuvent être déterminées à partir de la courbe de traction [9,10]:

- Le module d'élasticité  $E$  (ou module de Young): Il est donné par la pente du domaine élastique de la courbe contrainte  $\sigma$  – déformation  $\varepsilon$ .
- La limite d'élasticité  $R_e$ : c'est la valeur de la limite de la déformation élastique et le début de la déformation plastique. Dans certains cas il est difficile de la définir avec précision (la déformation plastique apparaît souvent progressivement). Donc, on définit une limite conventionnelle d'élasticité  $R_{0.2}$ , qui correspond à une déformation permanente de 0.2%.
- La résistance limite  $R_m$ : Elle correspond à la valeur maximale de la force appliquée avant la rupture.

Les résultats des essais de traction sont exprimés en fonction des grandeurs (contrainte et déformation) conventionnelles. Comme les dimensions de l'éprouvette changent au cours de la traction, on doit en tenir compte et corriger les valeurs de la contrainte et de la déformation ( $\sigma_c$ ,  $e$ ). Les expressions des grandeurs vraies (corrigées) sont données par les équations suivantes :

$$\varepsilon = \ln(1+e) \quad (\text{I.1})$$

$$\sigma = \sigma_c(1+e) \quad (\text{I.2})$$

### I.2.2. Etat de contrainte

Dans le cas d'une traction simple par exemple, si on exerce une force  $F$  sur un matériau de section droite  $S$ , la contrainte  $\sigma$  est donnée par [3] :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{I.3})$$

Unité de mesure de  $\sigma$  : Pa (pascal) =  $\text{N/m}^2$  ou MPa =  $\text{N/mm}^2$ .

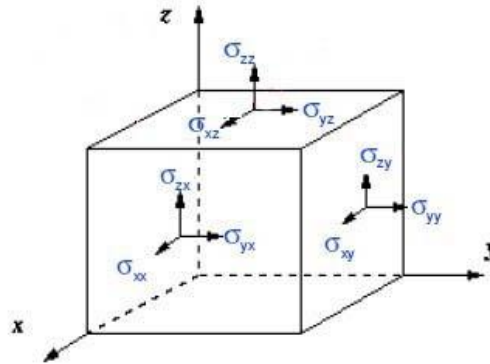
Une contrainte mécanique est considérée comme une densité surfacique de force. Elle représente le rapport de la force extérieure à l'aire de la section sur laquelle elle est appliquée. Dans le cas général, pour définir l'état de contrainte en un point quelconque d'un matériau soumis à une force, on considère autour de ce point un cube infinitésimal en équilibre (Figure I.3) et on exprime les contraintes subies par 3 faces. Chaque face subie une contrainte qu'on peut décomposer en une composante de traction/compression et deux composantes de cisaillement. Ce qui nous donne neuf composantes de tenseur de contraintes en tout point [4].

On écrit le tenseur en donnant l'ensemble de ses composantes:

$$\sigma = \bar{\bar{\sigma}} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (\text{I.4})$$



Les indices de chaque composante indiquent la face et le sens d'application de la contrainte.  $\sigma_{xy}$  Correspond la contrainte appliquée selon  $Ox$  sur la face perpendiculaire à l'axe  $Oy$



**Figure I.3.** Définition des composantes du tenseur des contraintes autour d'un point O [5].

### I.2.3. Etat de déformation

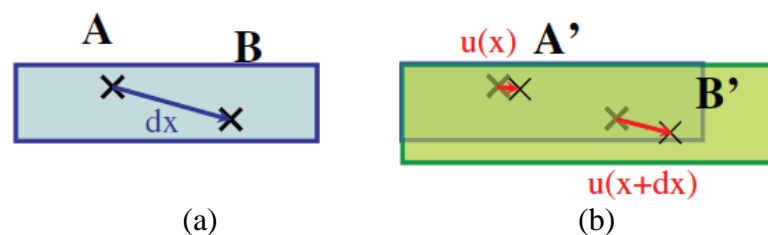
Sous l'action d'une contrainte suffisante, un matériau donné subit un changement de forme et de dimensions. Ce changement s'appelle déformation. Les déformations caractérisent le changement de forme local en tout point du matériau, indépendamment de sa nature et de ses caractéristiques de résistance [6].

Dans le cas d'une traction simple par exemple, la déformation est définie comme le rapport de l'allongement  $\Delta L$  à la longueur initiale  $L_0$  du matériau [2].  $L$  est la longueur finale après déformation.

$$e = (L - L_0) / L_0 = \Delta L / L \quad (\text{I.5})$$

Dans le cas général, en réponse à la contrainte appliquée (tenseur), le matériau subit localement des déformations données par un tenseur. Pour établir la forme du tenseur des déformations, on considère deux points A et B, distant de  $dx$ , d'un solide non déformé (Figure I.4-a). Dans l'état déformé (Figure I.4-b), les points correspondants après déformation A' et B' se sont déplacés des vecteur  $u(x)$  et  $u(x + dx)$  respectivement. Alors, la relation précédente (I.5) devient [4]:

$$e = \frac{\Delta L}{L} = \frac{A'B' - AB}{AB} = \frac{u(x+dx) - u(x)}{dx} \quad (\text{I.6})$$



**Figure I.4.** Schéma permettant de définir le tenseur des déformations. (a) solide non déformé, (b) solide déformé [4].

Le tenseur des déformations correspond uniquement à la partie symétrique de la dérivée des déplacements [4] :

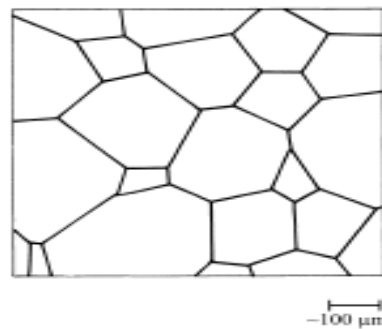
$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{I.7})$$

Par analogie au tenseur des contraintes, on peut écrire le tenseur des déformations sous la même forme :

$$\bar{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (\text{I.8})$$

### I.3. Microstructure des matériaux métalliques

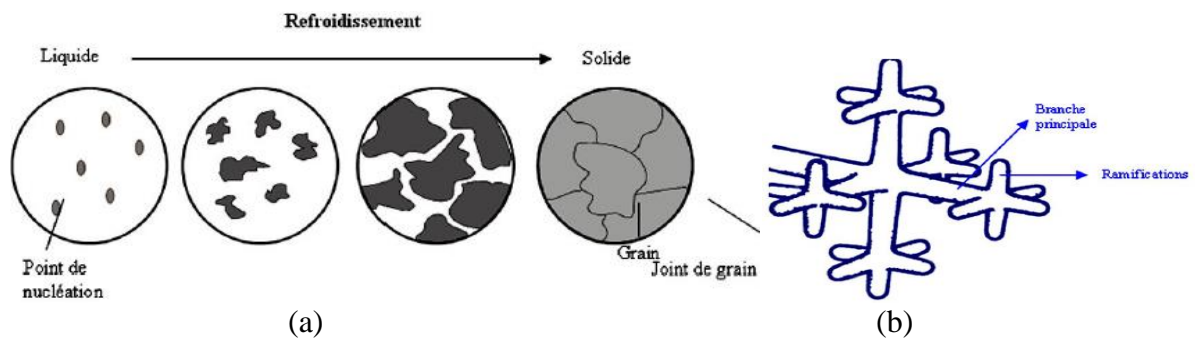
A l'échelle microscopique, les matériaux métalliques sont composés de grains et généralement de différentes phases. L'observation des limites de grains (joints de grains) à l'aide d'un microscope (optique, électronique,...) permet de mettre en évidence la morphologie des grains cristallographique (monocristaux d'orientations différentes), comme le montre la Figure I.5. La composition chimique et la microstructure d'un matériau déterminent ses propriétés [10].



**Figure I.5.** Joints de grains d'un métal pur observés au microscope optique en lumière réfléchie [10].

#### I.3.1. Métaux purs

La Figure I.6 montre le processus de formation par solidification d'un métal pur polycristallin à partir de l'état liquide. Avec le refroidissement, de petits germes se forment et grandissent, parfois en formant des dendrites (Figure I.6-b), jusqu'à ce qu'on obtienne une structure polycristalline formée de grains séparés par des joints de grains [10].

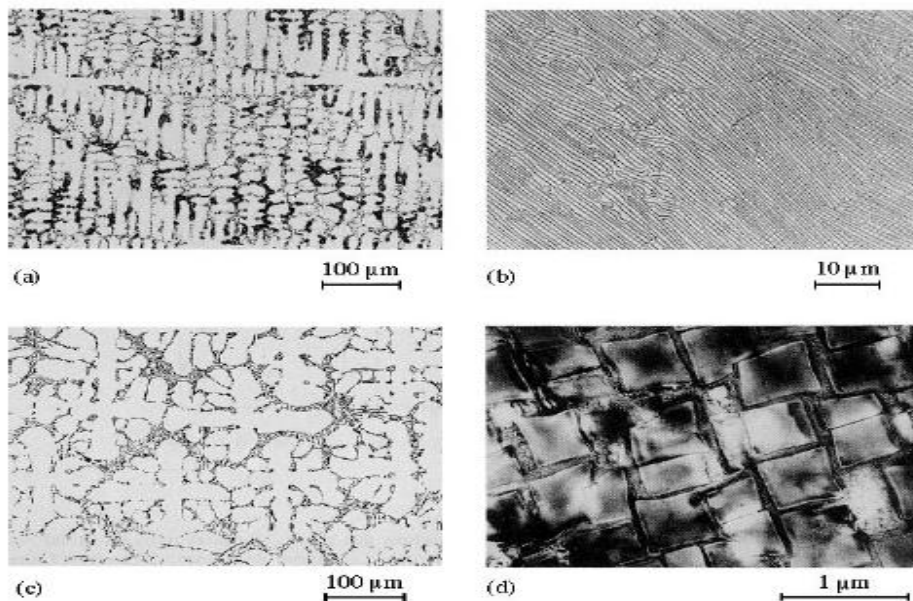


**Figure I.6.** (a) Cristallisation d'un métal et formation des grains par nucléation hétérogène, (b) Représentation schématique d'une dendrite en formation dans un métal pendant la solidification [31].

### I.3.2. Alliages métalliques

Les microstructures observées dans les alliages métalliques sont principalement de quatre types [10]:

- Les cristaux dendritiques (Figure I.7-a).
- Les microstructures eutectiques (Figure I.7-b).
- Les microstructures mixtes dendritiques et eutectiques (Figure I.7-c).
- Les particules de petite taille (précipités) qui apparaissent à l'état solide (Figure I.7-d).



**Figure I.7.** Microstructures des alliages métalliques: (a) dendrites, (b) eutectique lamellaire, (c) dendrites et eutectique inter dendritique, (d) précipités formés à l'état solide à l'intérieur des grains [10].

## I.4. Dislocations et déformation plastique

La déformation plastique des matériaux cristallins est principalement régie par le mouvement de défauts cristallins appelés dislocations. Les dislocations affectent considérablement les propriétés physiques des matériaux [12].

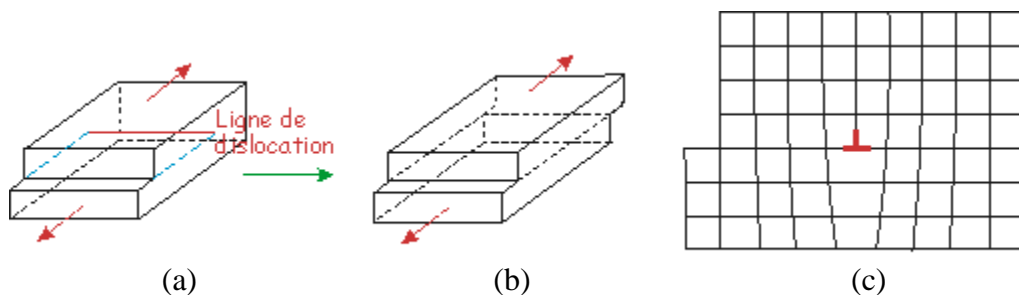
### I.4.1. Dislocations

Une dislocation est un défaut linéaire, c'est une perturbation de la structure du cristal le long d'une ligne ou d'un rangé (ligne de dislocation). On distingue principalement deux types de dislocations : coin et vis.

#### ✓ Dislocation coin

Le concept de dislocation a été proposé par Volterra à travers un modèle qu'on peut comprendre comme suit :

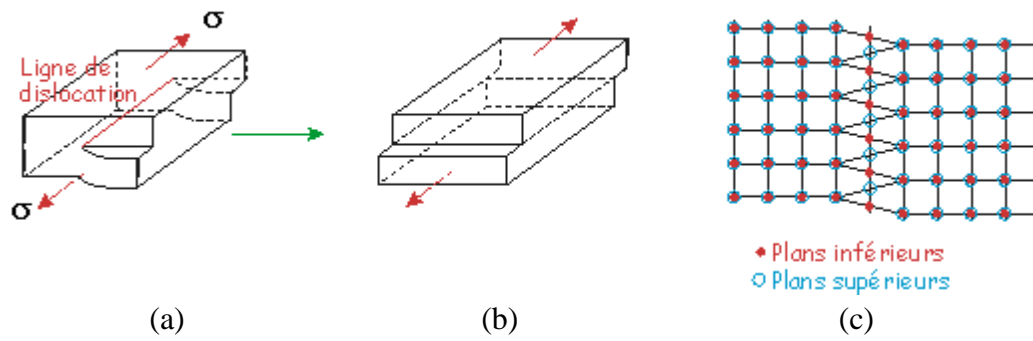
A partir d'un cristal parfait, on réalise une coupe selon un plan puis nous cisailons la partie supérieure du cristal suivant ce plan d'une distance interatomique (Figure I.8-a). On obtient la configuration d'un demi-plan atomique supplémentaire inséré dans un cristal parfait, les autres plans (plans adjacents) se resserrent pour combler le vide (Figure I.8-b). Le bord inférieur de ce demi-plan supplémentaire constitue une discontinuité appelée dislocation (Figure I.8-c), elle est sous forme d'une ligne autour de laquelle l'arrangement atomique est perturbé. Le diamètre de la zone de perturbation locale (appelée cœur de la dislocation) est de l'ordre de quelques distances interatomiques [12].



**Figure I.8 :** Représentation schématique d'une dislocation coin.

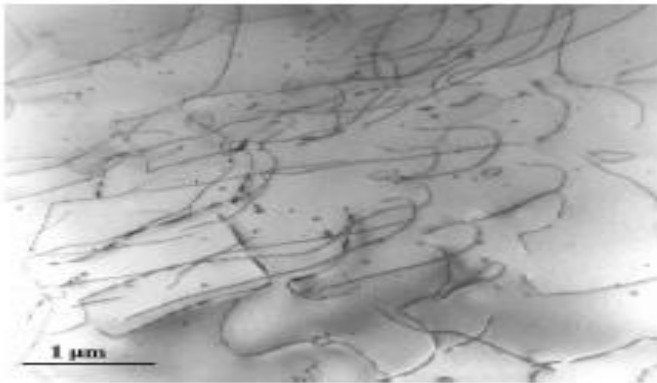
#### ✓ Dislocation vis

A partir d'un cristal sans défaut nous cisailons la partie supérieure du cristal suivant un plan et on fait glisser d'une distance interatomique l'un des bords par rapport à l'autre en exerçant la contrainte  $\sigma$  parallèlement au fond de la coupe (Figure I.9-a). On obtient une perturbation du réseau cristallin le long d'une ligne (Figure I.8-c), c'est la dislocation vis [12,13].



**Figure I.9 :** Représentation schématique d'une dislocation vis.

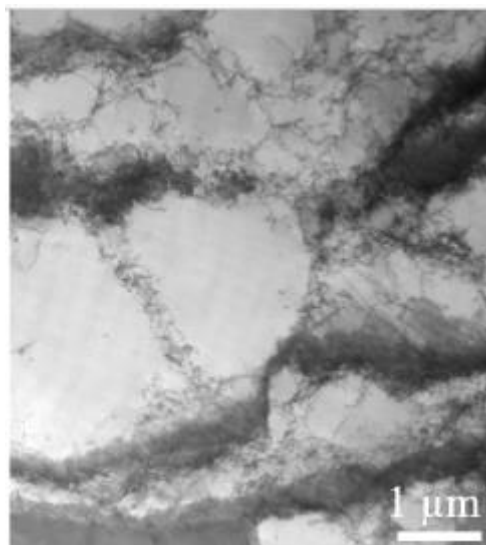
Les dislocations peuvent être observées à l'aide de la Microscopie Electronique en Transmission (MET). La figure I.10 est une image MET mettant en évidence la distribution des dislocations dans du quartz.



(L'échelle de cette image 1  $\mu\text{m}$ )

**Figure I.10 :** Image en MET montrant des dislocations dans le quartz [27].

La figure I.11 représente la formation de cellules de dislocations dans un échantillon de nickel déformé en traction jusqu'à 13% de déformation à température ambiante.

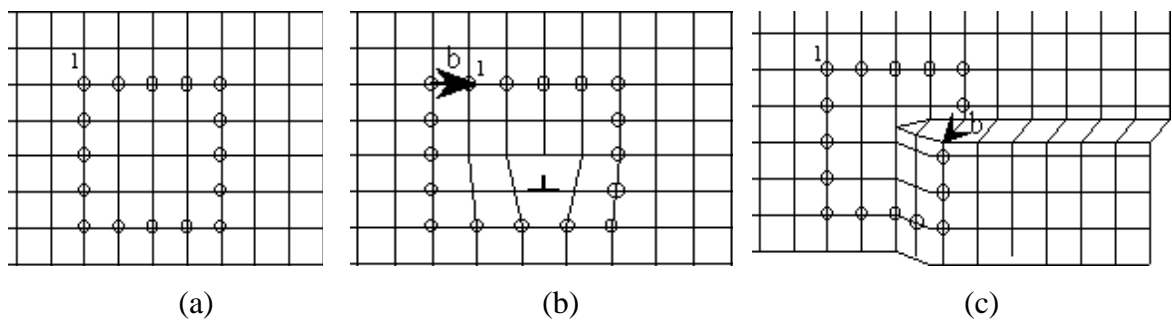


**Figure I.11 :** Formation de cellules de dislocations [32].

### I.4.2. Vecteur de Burgers et types de dislocations

Le vecteur de Burgers est défini comme le défaut de fermeture d'un circuit atomique effectué autour de la dislocation. On réalise d'abord un circuit fermé dans un cristal parfait en partant d'un atome quelconque (Figure I.12-a). En effectuant les mêmes déplacements élémentaires dans les deux sens pour les deux directions (verticale et horizontale), on obtient un déplacement total nul. C'est-à-dire un défaut de fermeture nul (circuit fermé).

Si on trace le même circuit autour d'une dislocation coin (Figure I.12-b), on trouve un défaut de fermeture non nul qui représente le vecteur de Burgers  $\vec{b}$ . Ce dernier est perpendiculaire à la ligne de dislocation. Dans le cas d'une dislocation vis (Figure I.12-c), on trouve un vecteur de Burgers  $\vec{b}$  parallèle à ligne de dislocation.



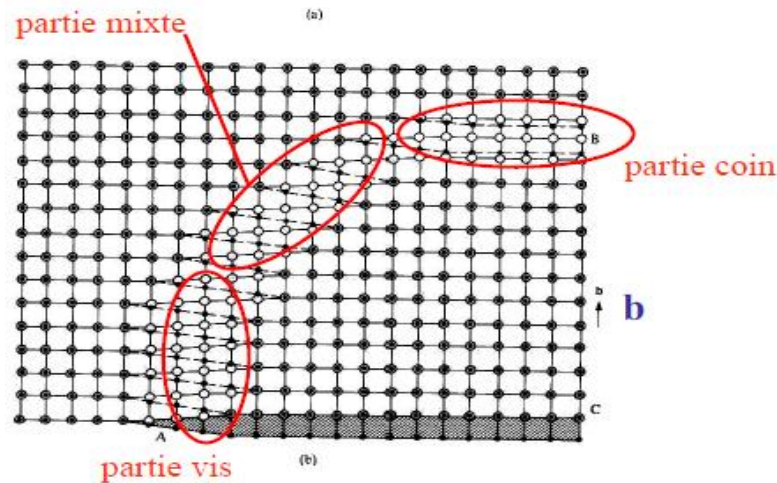
**Figure 1.12:** Circuit de Burgers et vecteur de Burgers. (a) Circuit dans un cristal parfait, (b) circuit autour d'une dislocation coin et (c) circuit autour d'une dislocation vis [11].

Soit  $\vec{l}$  un vecteur unitaire directeur de la ligne de dislocation. Le type de dislocation est défini par l'angle entre la ligne de dislocation  $\vec{l}$  et vecteur de Burgers  $\vec{b}$  :

- ✓ **Dislocations coin:** le vecteur de Burgers est perpendiculaire à la ligne de dislocation ( $\vec{b} \perp \vec{l}$ ).
- ✓ **Dislocation vis :** le vecteur de Burgers est parallèle à la ligne de dislocation ( $\vec{b} // \vec{l}$ ).
- ✓ **Dislocation mixte :** le vecteur de Burgers et la dislocation font un angle  $\theta$  quelconque. Dans ce cas, on peut toujours décomposer le vecteur de burgers en deux composantes et dire que la dislocation mixte a deux composantes :

Une composante coin de vecteur de burgers  $b_{\text{coin}} = b \cdot \sin(\theta)$  et une composante vis de vecteur de burgers  $b_{\text{vis}} = b \cdot \cos(\theta)$ .

La Figure I.13 montre une dislocation présentant des portions de différents types [13].

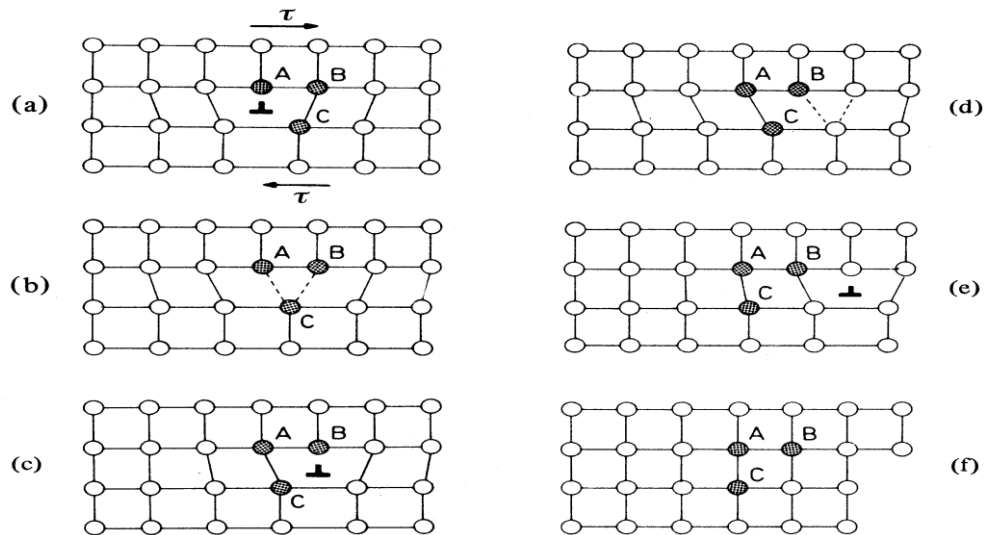


**Figure I.13.** Dislocation présentant des portions de différents types [6].

### I.4.3. Mouvement des dislocations

L'existence des dislocations dans un cristal facilite la déformation plastique, par contre leur absence nécessite l'application d'une contrainte plus importante pour le déformer. La figure I.14 est une représentation schématique du mouvement d'une dislocation coin. Lors du passage de la dislocation à travers le cristal, il y a peu d'atomes impliqués et peu de liaisons à rompre simultanément. Ceci explique pourquoi les dislocations se déplacent sans difficulté en entraînant la déformation plastique du cristal. Le mouvement des dislocations se fait toujours dans une direction perpendiculaire à la ligne de dislocation [10].

Expérimentalement, le mouvement des dislocations est mis en évidence à travers des essais de déformations in-situ. La figure I.15 montre le déplacement d'une dislocation dans une solution solide de Ni(Al) contenant 10% d'aluminium à une température de 5°K. La dislocation est soumise à une contrainte de  $\sigma = 188$  MPa et glisse sur une distance de 400 angströms. Les nuances de gris correspondent au temps passé par la dislocation à l'endroit considéré. Plus la nuance est foncée plus la durée est longue [26].



**Figure I.14.** Déplacement d'une dislocation coin sous l'action d'une contrainte [10].



**Figure I.15 :** Mouvement des dislocations [26].

Le glissement des dislocations dépend de la nature du réseau cristallin du matériau déformé. Il ne peut avoir lieu que dans certains plans cristallographiques et selon des directions particulières [14]. Le plan et la direction de glissement définissent le système de glissement de la dislocation.

- La direction de glissement est la direction cristallographique la plus dense, car c'est dans ce cas que l'énergie de déplacement de la dislocation est la plus faible.
- Le plan de glissement est un plan de densité atomique élevée, mais pas toujours maximale. Les systèmes de glissements de différentes structures sont représentés dans le tableau I.1 [11]. Pour une structure cristalline donnée, le nombre de systèmes de glissement possibles fournit une première indication sur la ductilité de cette structure (Tableau I.2).



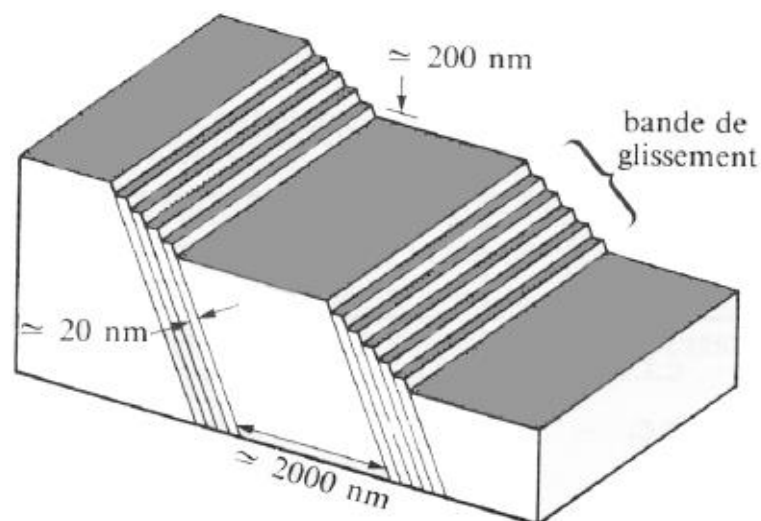
Structure	Métaux	Plans de glissement	Direction de glissement
CFC	Al, Ag, Cu, Fe, Ni, Au	(111)	[110]
CC	Fe $\alpha$ , Mo, Nb	(110), (112), (123)	[111]
HC	Ti, Zn, Mg, Cd, Be	(0001), (10T0), (10T1)	[1120]

**Tableau I.1.** Plans et directions de glissement pour quelques métaux usuels [9].  
CFC: cubique à faces centrées, CC: cubique centré, HC: hexagonale compacte.

Structure	Nombre de systèmes de glissement
CFC	12
HC	03
CC	12

**Tableau I.2 :** Nombre de systèmes de glissement par structure cristalline [11].

Sous l'effet des contraintes extérieures, les dislocations se déplacent et arrivent à la surface en entraînant la formation d'une marche de glissement. Il suffit pour cela que la force appliquée à la dislocation soit supérieure à la contrainte de friction du réseau. C'est ainsi que le glissement des dislocations régit la déformation plastique des matériaux cristallins [9]. A l'aide d'un microscope optique on peut observer ces bandes de glissement sur la surface d'un métal déformé. Un examen détaillé montre qu'elles sont constituées de lignes très fines et très rapprochées (Figure I.16) [9].



**Figure I.16.** Lignes et bandes de glissement sur une éprouvette déformée plastiquement.

#### I.4.4. Facteur de Schmid

Pour pouvoir glisser, une dislocation doit subir une contrainte suffisante selon un plan de glissement donné. La contrainte ressentie par la dislocation diffère de la contrainte extérieure appliquée. Considérant un matériau monocristallin, de forme cylindrique, soumis à une force de traction simple. Seule la composante de la force projetée sur un système de glissement activable peut induire une déformation plastique. Notons cette composante tangentielle par  $\tau$ . Avec les notations de la Figure I.17, on obtient une expression pour  $\tau$  :

$$\tau = \frac{F}{S_0} \cos \lambda \cos \mu \quad (\text{I.9})$$

Le terme  $(\cos \lambda \cos \mu)$  est appelé facteur de Schmid pour le système de glissement considéré. Ou  $\mu$  est l'angle entre l'axe de traction et la direction de glissement et  $\lambda$  l'angle entre la normale au plan de glissement et la direction de traction. Il permet de calculer la contrainte macroscopique nécessaire à l'activation d'un système de glissement en fonction de la direction de l'effort appliqué [15].

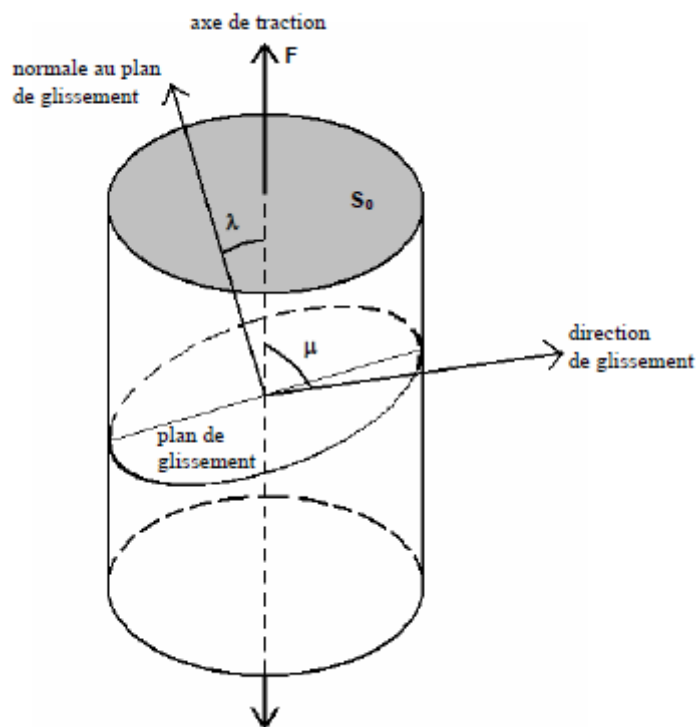


Figure I.17 : Schéma illustrant la loi de Schmid [15].

#### I.4.5. Interactions des dislocations

Durant la déformation plastique, les dislocations se multiplient et leur densité augmente. Elles interagissent entre elles et avec les autres défauts cristallins pour former des structures très complexes.

### I.4.5.1. Source de Frank et Read

Comme la densité des dislocations augmente pendant la déformation d'un matériau cristallin, ceci indique l'existence de sources qui permettent la multiplication des dislocations. La source de Frank et Read est l'une de ces sources.

Considérant le segment de dislocation présenté sur la Figure I.18-a. Il se trouve bloqué à ces extrémités par des obstacles. Quand on applique une contrainte de cisaillement  $\tau$  parallèle au plan de glissement au segment, la dislocation est soumise à une force perpendiculaire. La ligne de dislocation va se courber jusqu'à ce qu'elle se referme sur elle-même par attraction de portions de dislocations (Figures I.18-e et I.18-f). Ceci conduit à la formation d'une boucle de dislocation (Figure I.18-f) et ainsi le processus se répète plusieurs fois. Le rayon de courbure  $R$  est défini par la relation suivant [4,9]:

$$R = \frac{\mu b}{2\tau} \quad (\text{I.10})$$

$b$  est le vecteur de Burgers et  $\mu$  le module de cisaillement.

La contrainte que l'on doit appliquer pour faire opérer une telle source de dislocation est :

$$\tau = \frac{\mu b}{D} \quad (\text{I.11})$$

$D$  est la distance entre obstacles [4].

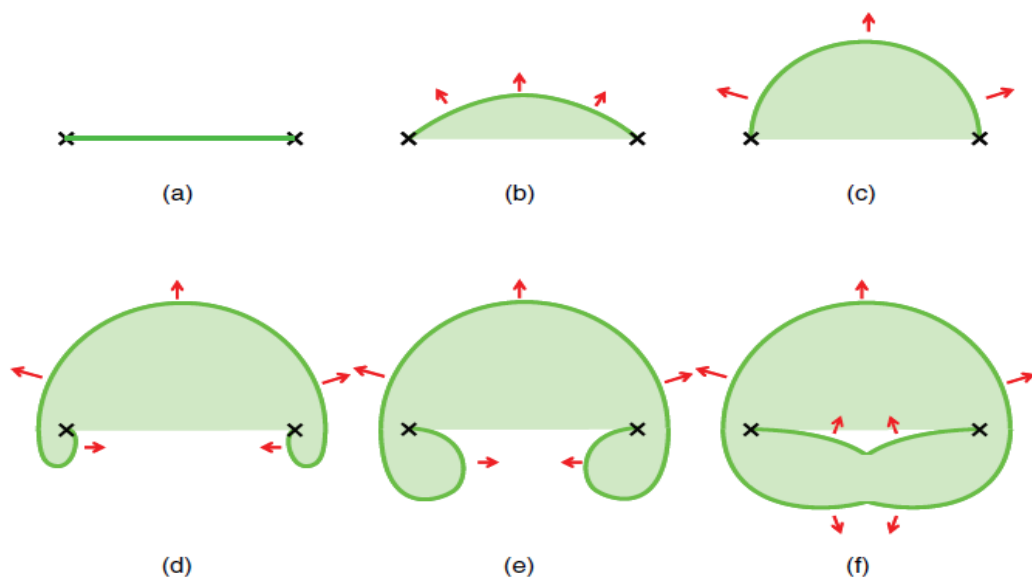
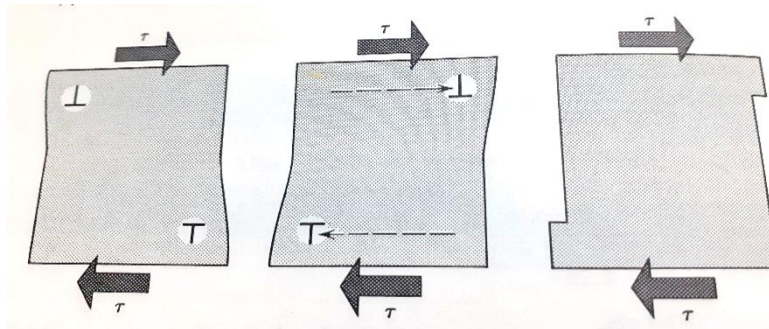


Figure I.18. Source de Frank et Read [4].

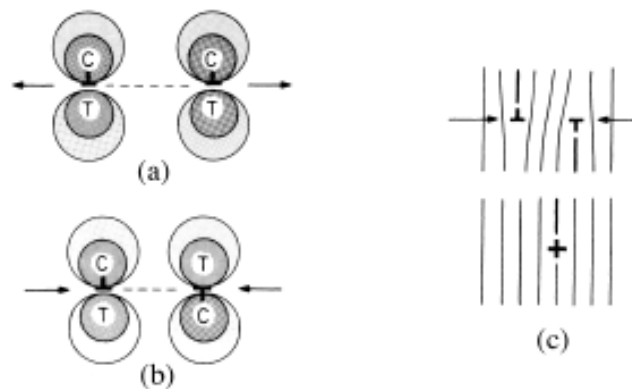
### I.4.5.2. Interaction entre dislocations

Différentes interactions peuvent se produire entre des dislocations à cause de leurs champs de contraintes. Par exemple, sous la même contrainte, les dislocations coin de signes opposés peuvent se déplacer dans des sens opposés en produisant des lignes en surface (Figure I.19).



**Figure I.19** : Dislocations de signes opposés se déplacent dans des sens opposés [12].

Lorsque deux dislocations coin se trouvent dans un matériau sur le même plan de glissement, elles exercent l'une sur l'autre soit une attraction ou une répulsion, suivant la direction de leur vecteur de Burgers (Figure I.20). Si les vecteurs de burgers de deux dislocations sont de même sens, alors il y a une répulsion entre les deux dislocations. Lorsque les vecteurs de Burgers sont de sens opposés, il y a attraction des dislocations qui vont tendre à se rapprocher et à s'annihiler.



**Figure I.20** : Interaction entre deux dislocations coin parallèles

(a) dislocations de mêmes signes; (b) dislocations de signes contraires.

(c) Processus d'annihilation mutuelle de dislocations de signes contraires [10].

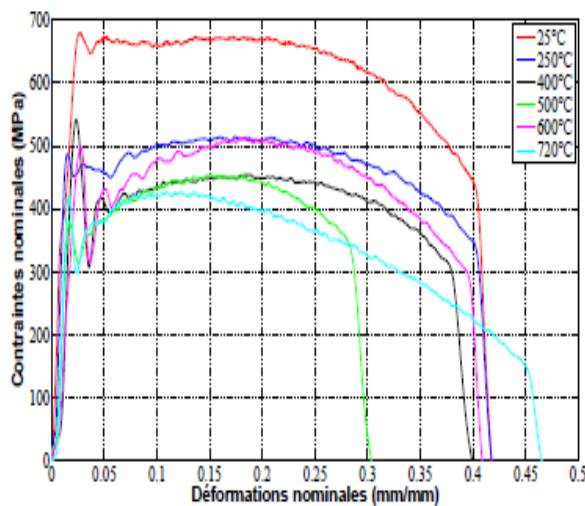
#### I.4.5.3. Interaction dislocations – joints de grain

Pendant la déformation plastique d'un matériau poly cristallin, les dislocations interagissent avec les joints de grains de manières différentes. Lorsqu'on observe l'empilement de dislocation aux joints de grains, cela montre que ces dernières peuvent constituer de véritables barrières vis à vis du déplacement des dislocations. Des contraintes internes sont générées par Ces empilements, ces contraintes peuvent activer des sources préexistantes de dislocations dans des grains voisins. Il y a des cas spécifiques où la transmission directe de dislocations au travers d'un joint de grain est possible. Les joints de grains souvent former des puits de dislocations mais ils peuvent également agir comme de véritables sources de dislocations. Dans certains

matériaux où la taille de grain est très petite pour autoriser l'opération de sources de Frank-Read, des arguments d'échelle et des simulations de dynamique moléculaire suggèrent que ce sont les joints de grains qui servent de source de dislocations. Les interactions entre les dislocations et les joints de grain peuvent être encore plus complexes quand des processus de recristallisation (comme la recristallisation par migration) entrent en jeu [15].

### I.5. Effets de la vitesse de déformation et de la température

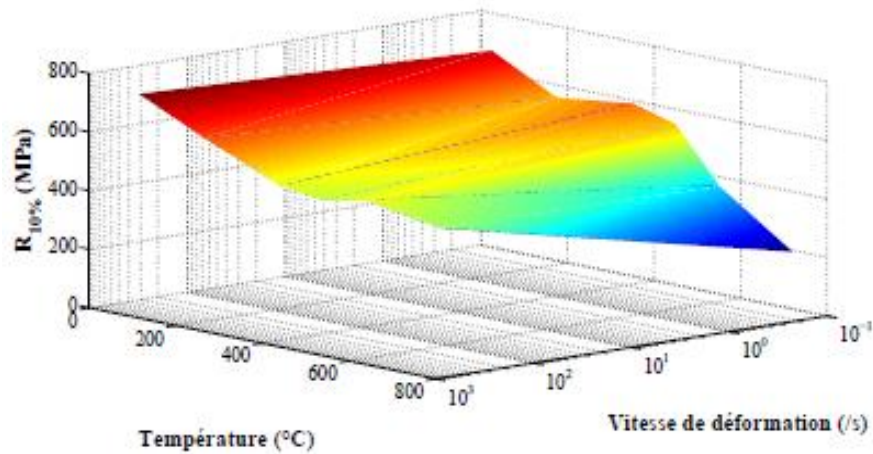
De nombreuses études expérimentales mettent en évidence la variation de la contrainte avec la température. Par exemple, la figure I.21 présente les courbes nominales de la contrainte à une vitesse de déformation de  $4 \times 10^2 \text{s}^{-1}$  pour les températures 250°C, 400°C, 500°C, 600°C et 720°C.



**Figure I.21.** Courbes nominales de traction du C68 pour différentes températures à la vitesse de déformation de  $4 \times 10^2/\text{s}$ .

(C68 est un type d'acier à haute teneur en carbone ( $> 0,5\%$ ) : ils sont employés pour des applications exigeant : grandes duretés, hautes résistances, tenue à l'usure. Il compose de 9 composants C, Mn, Si, P, S, P+S, Cr, Al).

Jusqu'à la température de 400°C, le matériau présente une sensibilité classique. Puis à la température de 500°C, le matériau présente un comportement similaire à celui observé à 400°C. C'est l'intervalle sur lequel se produisent les phénomènes de vieillissement dynamique qui conduisent à une rupture prématurée de l'échantillon à cette température. La zone de changement de sensibilité à la température n'est donc pas la même à cette vitesse de déformation que celle rencontrée à une vitesse de déformation de  $1 \times 10^{-1}/\text{s}$ . L'évolution de la contrainte équivalente à 10% de déformation plastique, en fonction de la température et de la vitesse de déformation est présentée sur la (figure I.22).



**Figure I.22.** Effet de la température sur la contrainte équivalente à 10% de déformation.

La zone de changement de sensibilité à la température est comprise entre 400°C et 500°C pour une vitesse de déformation de  $4 \times 10^2$ /s. Par contre pour une vitesse de  $1 \times 10^{-1}$ /s, elle apparaît à partir de 200°C. La diminution des contraintes observée à une vitesse de déformation de  $1 \times 10^{-1}$ /s est plus importante que celle observée à  $4 \times 10^2$ /s. Cette observation confirme l'existence de l'effet d'un couplage température/vitesse de déformation qu'il est nécessaire de prendre en compte pour décrire finement le comportement du matériau [33].

# **Chapitre II**

## **Méthodes d'analyse des déformations**

## Chapitre II

### Méthodes d'analyse des déformations

Cette deuxième partie est consacrée à une synthèse bibliographique sur les méthodes d'analyse des déformations. On s'intéresse principalement à la méthode de thermographie infrarouge qui sera utilisée pour analyser un essai de traction dans le troisième chapitre.

Pour analyser les déformations on a plusieurs techniques. On peut les classer en trois catégories: méthodes mécaniques, méthodes optiques directes et méthodes optiques indirectes.

#### II.1. Méthodes mécaniques

Les méthodes mécaniques sont les méthodes classiques les plus connues, elles imposent un contact entre le matériau déformé et l'outil de mesure [20]. On peut citer la traction, la compression, la flexion,...

##### II.1.1. Machine de traction

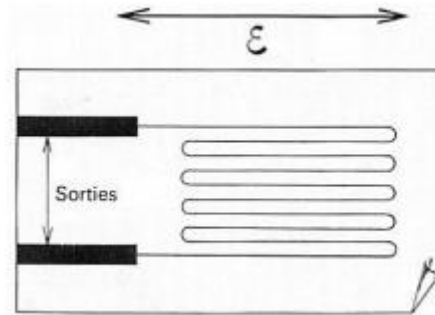
L'essai de traction, dont le principe a été détaillé dans le chapitre I, constitue un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des matériaux. Une machine de traction est constituée d'un bâti portant une traverse mobile. Un système de fixation permet l'installation de l'éprouvette de traction entre les traverses fixe et mobile. Le déplacement de la traverse mobile réalise la traction. La machine comporte une cellule de charge qui permet de mesurer l'effort appliqué à l'éprouvette et son déplacement peut être suivi de diverses façons [21]. Cette méthode peut donner uniquement une courbe de traction moyenne régissant le comportement du matériau. La précision de cette méthode est de l'ordre de  $\pm 0.02$  mm en déplacement et de  $\pm 1$  mm/min en vitesse de déplacement [20].

##### II.1.2. Jauges de déformation (extensomètres à fils résistants)

La jauge de déformation est un outil important pour la mesure des propriétés mécaniques d'un matériau. Le but des extensomètres à fils résistants (ou jauges de déformation) est de traduire la déformation d'une pièce en variation de résistance électrique (plus les extensomètres s'étirent, plus leurs résistances augmentent). La jauge de déformation sous sa forme la plus simple est constituée essentiellement d'un fil très fin, collé sur un support. La majeure partie de



sa longueur distribuée parallèlement à une direction donnée (figure II.1). Le fil est collé sur un support.



**Figure II.1.** Jauge de déformation [20].

La déformation ( $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ ) dans cette direction dépend de la variation de la résistance électrique de fil. On peut déterminer la déformation à partir de la mesure de la tension ou du courant [20]. La relation entre la déformation et la résistance est :

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{K} * \frac{\Delta R}{R} \quad (\text{II.1})$$

Où R est la résistance électrique et K le facteur de jauge, il dépend essentiellement du coefficient de Poisson ( $K = C(1-2\nu)+1+2\nu$ , où C constante dépend du matériau). Plus le facteur de jauge sera grand, plus la sensibilité de la jauge sera grande [21]. Cette méthode peut détecter des déformations comprises entre  $10^{-4}\%$  et 10%. Comme aussi on trouve des jauges qui détectent des déformations atteignant 20 à 25 %. Noter qu'on peut utiliser plusieurs jauges simultanément pour augmenter le nombre de points de mesure [20].

### II.1.3. Extensomètres

Les extensomètres sont utilisés pour la mesure directe de la déformation en essai de traction. On peut mesurer une déformation longitudinale et transversale. La précision d'un extensomètre est entre  $10^{-4}\%$  et 50%. On peut aussi coupler deux extensomètres pour caractériser plusieurs régions de l'éprouvette [20,22].

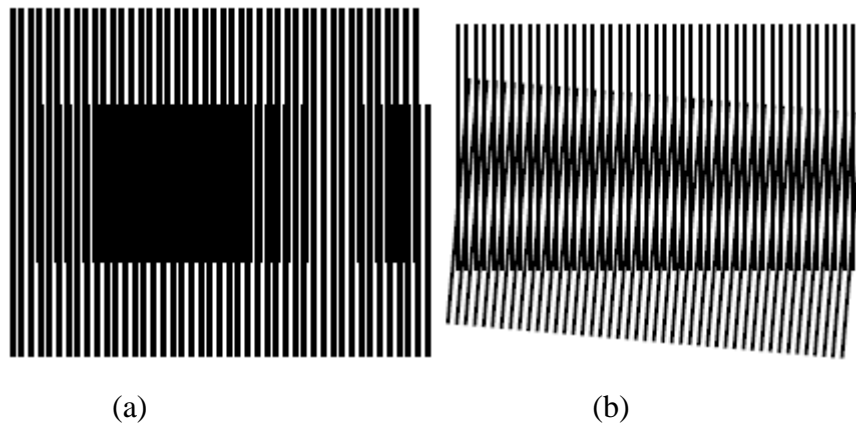
## II.2. Méthodes optiques indirectes

### II.2.1. Méthode de moiré

Le moiré est un phénomène d'interférence géométrique, ce phénomène compose de deux réseaux chaque un à une périodicité différent. Ces réseaux sont généralement parallèles, l'un des deux est transparent et l'autre est sombre (figure II.2) [16]. Un réseau, solidaire, on le met

sur la surface de l'échantillon à étudier et l'autre est un témoin (référence). Après la déformation on met le réseau témoin sur le réseau solidaire (déformé), il donne un moiré. La diffraction optique donne une distribution de franges claires et sombres, ces franges nous permettent de mesurer les déplacements et les déformations. La précision de mesure des déformations est comprise entre 0.001% et 50% [20].

Pour dire que la déformation est positive (traction) ou négative (compression), il faut tourner le réseau de référence. Si les franges de moiré tournent selon le même sens, la déformation est positive, sinon il est négative [23].

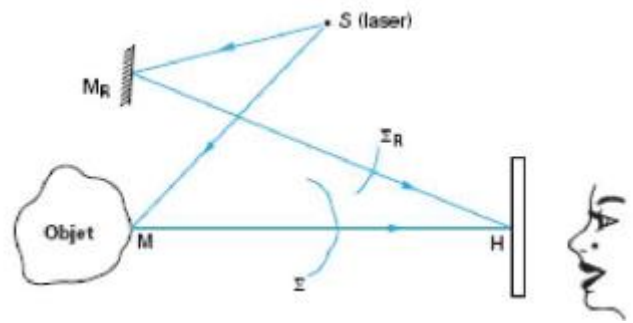


**Figure II.2.** Principe du phénomène de moiré. (a) Moiré de réseaux de pas voisins.  
(b) Moiré de réseaux de même pas inclinés l'un par rapport à l'autre.

### II.2.2. Interférométrie holographique

L'interférométrie holographique est une méthode qui permet de reconstituer une image en trois dimensions d'un objet à partir d'un enregistrement effectué sur une plaque photographique. Le principe de cette méthode consiste à enregistrer sur un support holographique le champ d'interférence entre une lumière diffusée par un objet éclairé via un laser et une onde de référence provenant directement du même laser [19]. Le champ obtenu est appelé hologramme qui traduit l'interférence entre la formation de l'image initiale et celle de l'onde de référence. La figure II.3 suivante montre l'interférométrie holographique.

La précision de cette méthode est de l'ordre de  $0.05\mu\text{m}$  en déplacement. Cette technique nécessite un montage expérimental énorme (laser, lentilles...) et une isolation de vibration extérieure. Lors de l'enregistrement de l'hologramme il faut réaliser une noire absolu [20].

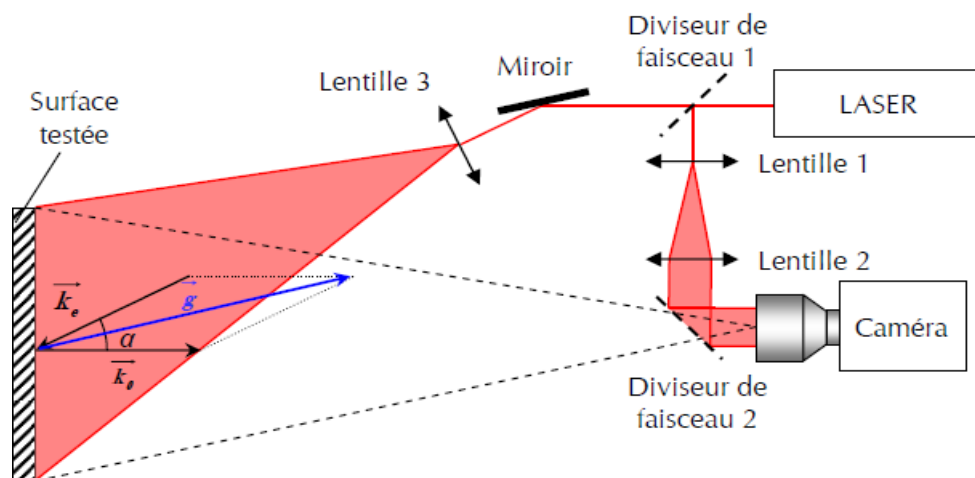


**Figure II.3.** Principe de l'enregistrement d'un hologramme [19].

### II.2.3. Interférométrie speckle (granularité laser)

L'interférométrie speckle a le même principe que l'interférométrie homographique. Dans la méthode de speckle on remplace la plaque photographique par une caméra CCD (coupled charged device). Avec cette technique on obtient des champs de déplacements tridimensionnels. Dans l'interférométrie de speckle on met une lentille pour former l'image de l'objet dans les capteurs CCD. Elle est très utilisée dans l'industrie grâce à ses avantages (bien adaptée, elle permet d'avoir accès aux trois composantes du déplacement d'une surface, traitement numérique des données en temps quasi réel...). La gamme de mesure est limitée à  $20\mu\text{m}$  entre deux états successifs. Cette technique permet d'acquisition de séries d'images et la mesure de faibles déplacements [20,22].

La figure II.4 montre le principe de la méthode interférométrie speckle: on voit un faisceau laser est divisé en deux par une lame séparatrice, un premier faisceau est envoyé directement vers la caméra et servira de faisceau de référence tandis que l'autre est agrandi et envoyé vers la surface (« rugueuse ») à étudier [23].



**Figure II.4.** Schéma d'interférométrie de speckle [23].

### II.2.4. Shearographie

La shearographie est une technique optique de mesure d'un champ de déformation et est appelée aussi interférométrie différentielle de speckle. Elle consiste à mesurer le gradient de déplacement sur une figure d'interférence (entre deux images dépendant de la forme de la surface avant et après sollicitation). La soustraction de ces deux informations révèle la déformation subie par la structure entre ces deux états. On éclaire avec une lumière cohérente un objet puis on le réfléchit vers une installation optique, cette installation crée une paire d'images « cisillées ». Ces images créent un interférogramme speckle. On fait la même procédure après déformation, puis on compare entre les deux et on distingue la différence entre les deux phases. On obtient une figure de franges, à partir de laquelle on déduit le champ de déplacement [20,22]. La Shearographie détecte des déplacements faibles et sa précision est de l'ordre de  $2\mu\text{m}$  [20,22].

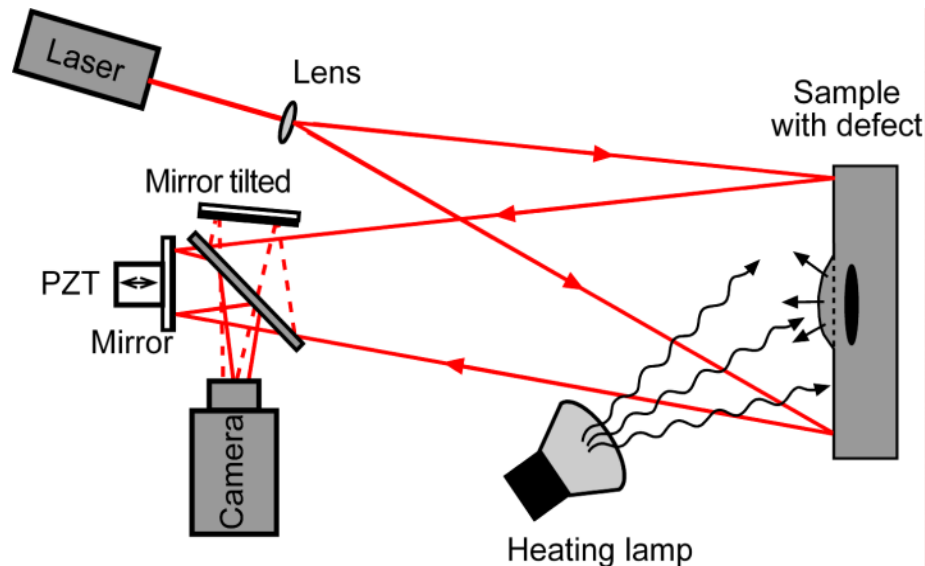


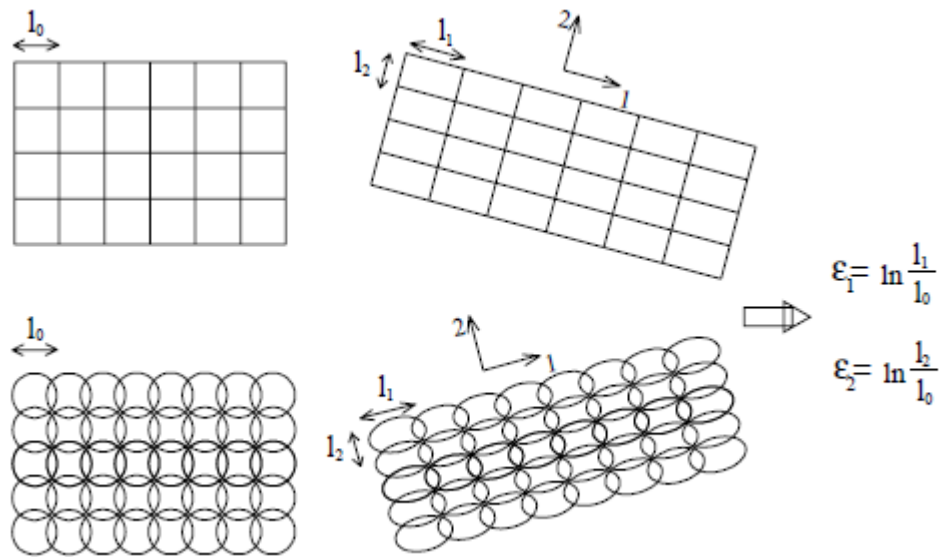
Figure II.5. Principe de fonctionnement de la Shearographie.

## II.3. Les méthodes optiques directes

### II.3.1. Mesure des variations des caractéristiques géométriques d'un réseau

Cette méthode est basée sur un codage périodique de la surface étudiée en traçant sur le matériau à déformer un réseau de motif géométrique (cercle ou carré). Après déformation, les cercles deviennent des ellipses, le grand axe et le petit axe de l'ellipse correspondent aux directions de la déformation. Par contre, dans le cas d'un réseau carré, il faut connaître au préalable les directions principales de déformation auxquelles il faut faire correspondre les côtés du carré (figure II.6) [20,22].

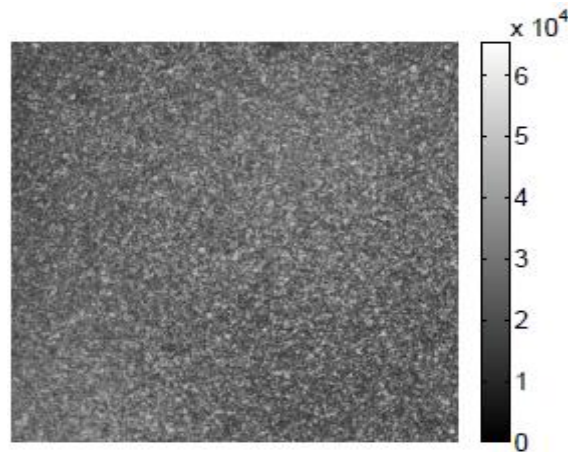
Dans de bonnes conditions, les déformations détectées sont de 1% à 100% avec une précision de  $\pm 0.5\%$ . Il y a des nouvelles méthodes développées pour le calcul de déformation sur des surfaces à 3D mais leur mise en œuvre reste difficile [20,22].



**Figure II.6.** Déformations calculées pour des variations de longueurs de réseaux carré et cercle [20,22].

### II.3.2. Méthode de corrélation d'images

La corrélation d'image est une méthode optique sans contact (indirect) de mesure de champs. Cette méthode est une méthode expérimentale alternative aux techniques classiques de mesures locales (jauges de déformation, extensomètres...). Elle a plusieurs avantages : l'absence de contact, la souplesse de son adaptation. En plus, elle ne nécessite que peu de matériel: une caméra CCD, une carte d'acquisition et un ordinateur muni des logiciels adaptés pour l'acquisition et le traitement des données Cette méthode a été développée au début des années 80. Le principe de cette technique consiste à corréler deux images grâce aux variations de texture de la surface de l'objet observé. Pour cela un motif aléatoire est utilisé de type mouchetis de peinture par exemple (graine), qui fournit le codage nécessaire à la surface pour permettre ensuite la corrélation. La figure II.7 montre un exemple de codage à niveau de gris aléatoire [17].

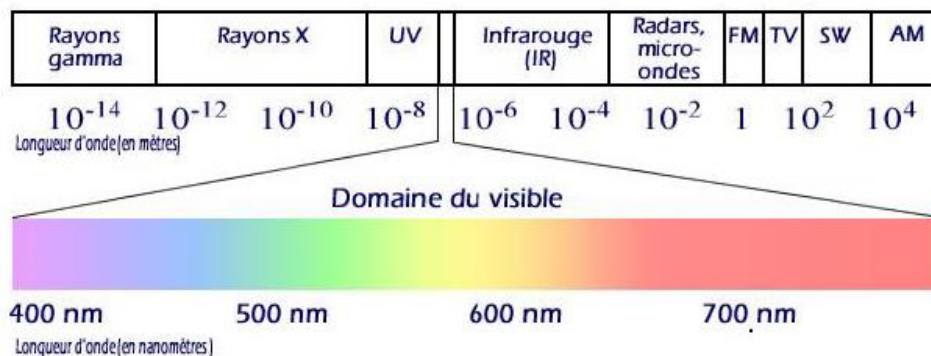


**Figure II.7.** Codage aléatoire d'une surface.

Pour déterminer le champ de déformation il faut : d'abord prendre des images avec une caméra numérique avant et après la déformation. Puis on applique une grille virtuelle composé de carrée sur l'image initiale, et on trouve la position de chacun de ces carrées dans l'image finale. Par comparaison on obtient le champ de déplacement correspond. Cette méthode peut détecter des déplacements à  $\pm 1/60^{\text{ème}}$  de pixel près, et des déformations calculées de l'ordre de 0.5% et 100% [20,22].

### II.3.3. La thermographie infrarouge

L'infrarouge est une gamme du spectre électromagnétique, il est situé après le spectre visible (figure II.8). Les longueurs d'ondes associées sot entre  $10^{-3}$  et  $7.8 \cdot 10^{-7}$  m. L'origine de l'infrarouge est la chaleur. Tout corps à une température supérieure à 0 K ( $-273.15^{\circ}\text{c}$ ) émet un rayonnement infrarouge. On détecte se rayonnement sous forme de chaleur, l'énergie du rayonnement infrarouge émet est reliée à sa température (plus l'objet est chaud, plus la quantité de rayonnement infrarouge est grande) [22].



**Figure II.8.** Le spectre électromagnétique [28].

La thermographie infrarouge est une méthode optique directe. Les nouvelles caméras thermiques permettent d'avoir directement le champ de température de la surface sans contact. En analysant le rayonnement émis par un corps, cette technique nous permet de visualiser des gradients de température [22]. Les caméras infrarouges captent le rayonnement entre 3.6 et 13 micros de longueur d'onde et le convertissent en image thermique.

## II.4. Analyse des déformations à l'aide de la thermographie infrarouge

Depuis quelques années, l'utilisation de la thermographie infrarouge dans le domaine de la mécanique des matériaux s'est développée dans de nombreux laboratoires et centres de recherche. Ce développement a été en grande partie favorisé par les progrès réalisés en matière de numérisation. Les nouveaux systèmes thermographiques permettent une mesure sans contact de champs de température de surface à des cadences atteignant plusieurs centaines de Hertz pour des images allant jusqu'à 80 000 pixels. De façon courante, les variations de température détectables vont de quelques dixièmes à quelques centaines de degré Celsius. L'intérêt de cette technique est que la déformation d'un matériau s'accompagne presque toujours de dégagements de chaleur et donc, le plus souvent, de variations de températures [18].

### II.4.1. Présentation de la méthode de la thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est basée sur le phénomène de rayonnement infrarouge. Cette technique de mesure est utilisée en mécanique des matériaux pour quantifier les transformations de phase, les phénomènes de plasticité et le comportement en fatigue mécanique [28]. La caméra infrarouge détecte les rayonnements émis par un matériau (scène thermique), le système radiométrique (caméra thermique) convertit la puissance de rayonnement en signaux numériques (ou analogiques) : ces signaux sont transcrits en température par le ordinateur et transformés en points lumineux sur un écran. L'image obtenue s'appelle "Thermo gramme" (figure II.9).

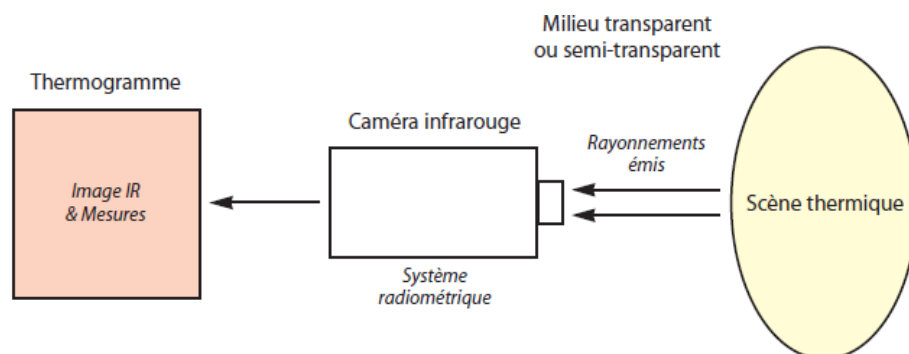


Figure II.9. Principe de la caméra infrarouge [29].

## II.4.2. Quelques principes et lois physiques

### II.4.2.1. Modes de transfert de la chaleur

La chaleur peut être transférée principalement en trois modes : conduction, convection et rayonnement (figure II.10).

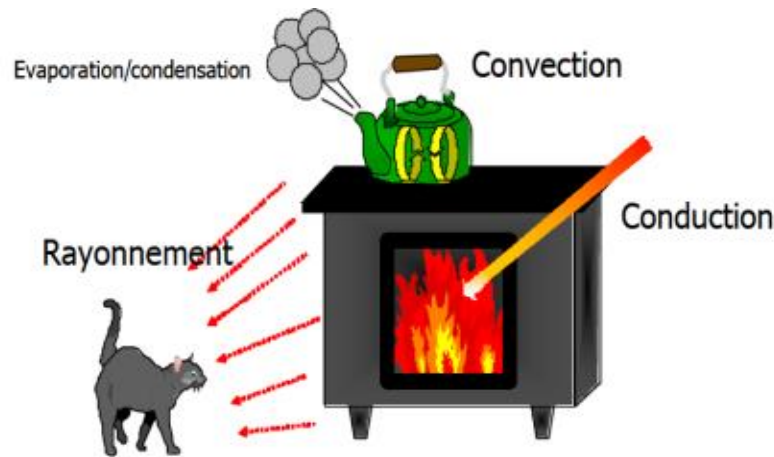


Figure II.10. Mode de transfert de la chaleur [24].

#### a. La conduction thermique

La conduction thermique est un mode d'échange de chaleur basé sur les interactions directes d'une particule avec ses proches voisins. C'est un mode de transfert d'énergie mis en œuvre en radiométrie photo thermique, pour permettre l'analyse de la structure interne des échantillons étudiés.

#### b. La convection thermique

La convection thermique est un mode d'échange de chaleur qui s'opère par mouvement de fluide. C'est un mode de transfert d'énergie souvent négligeable en thermographie infrarouge et en radiométrie photo thermique.

#### c. Le rayonnement thermique

Le rayonnement thermique est un mode d'échange de chaleur qui se fait par voie électromagnétique (lumière). C'est le mode de transfert d'énergie qui est à la base de la thermographie infrarouge et de la radiométrie photo thermique [25].

### II.4.2.2. Le corps noir

Le corps noir est un objet idéal (n'existant pas physiquement) qui absorbe tous les rayonnements incidents quelque soient leur longueurs d'ondes et leurs directions et qui émet conformément à la loi de Planck. Le corps noir peut être caractérisé par trois lois : la loi de Planck, la loi de Wien et la de Stefan-Boltzmann.



### a. Loi de Planck

L'énoncé de la loi de Planck est le suivant : l'émission d'ondes électromagnétiques par un corps à une température T se fait pour une longueur d'onde  $\lambda$ , selon la loi [25] :

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \quad (w/cm^2 \cdot \mu m) \quad (II.2)$$

Avec: c : vitesse de la lumière (c = 3 108 m/s)

h : Constante de Planck (h = 6,62 10<sup>-34</sup> J/s ou Watt.s<sup>2</sup>)

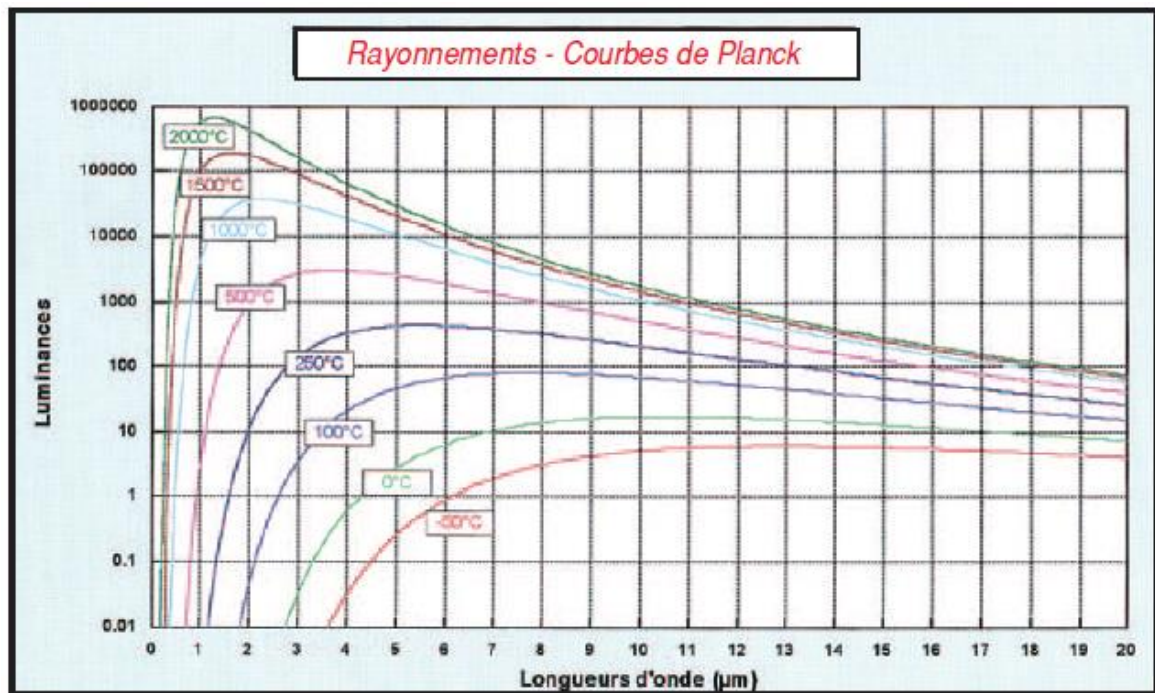
k : Constante de Boltzmann (k = 1,38 10<sup>-23</sup> J/K ou W.s<sup>2</sup>/K)

$M_{\lambda}$  : Emittance monochromatique du corps (W/m<sup>3</sup>)

T : Température (K)

$\lambda$  : Longueur d'onde (m)

Cette loi est représentée par des courbes ci-dessous :



**Figure II.11.** Emittance spectrale radiante d'un corps noir selon la loi de Planck pour différentes températures absolues [29].

On remarque à partir de ce graphe que :

- Le spectre d'émission du corps noir est continu.
- La puissance électromagnétique émise croît avec la température du corps noir.

- L'émission de rayonnement passe par un maxima : ce maxima se produit à des longueurs d'onde de plus en plus faibles lorsque la température du corps noir croît.
- A partir d'une température de l'ordre de 520°C, l'émission du rayonnement infrarouge apparaît dans le domaine spectral visible (0,4-0,8µm) : les objets chauffés au moins à cette température deviennent donc visibles par l'œil humain de par la couleur rouge sombre. En-dessous de cette température, nous ne "voyons" pas les températures car l'émission de rayonnement se fait au-delà de la bande spectrale sur laquelle sont calibrés nos yeux. Dès lors, pour visualiser des corps dont la température est inférieure à 520°C, il faut utiliser des appareils dont le seuil de détection est inférieur à celui de l'œil humain [29].

### b. Loi de Wien

L'énoncé de la loi de Wien est le suivant : Le produit de la température de la surface émettrice du rayonnement thermique, exprimée en Kelvin, par la longueur d'onde du maximum de rayonnement ( $\lambda_m$ ), exprimée en micromètres est égal à une constante :

$$\lambda_m \cdot T = 2898 \quad (\text{II.3})$$

Avec :  $\lambda_m$  : Longueur d'onde (µm).

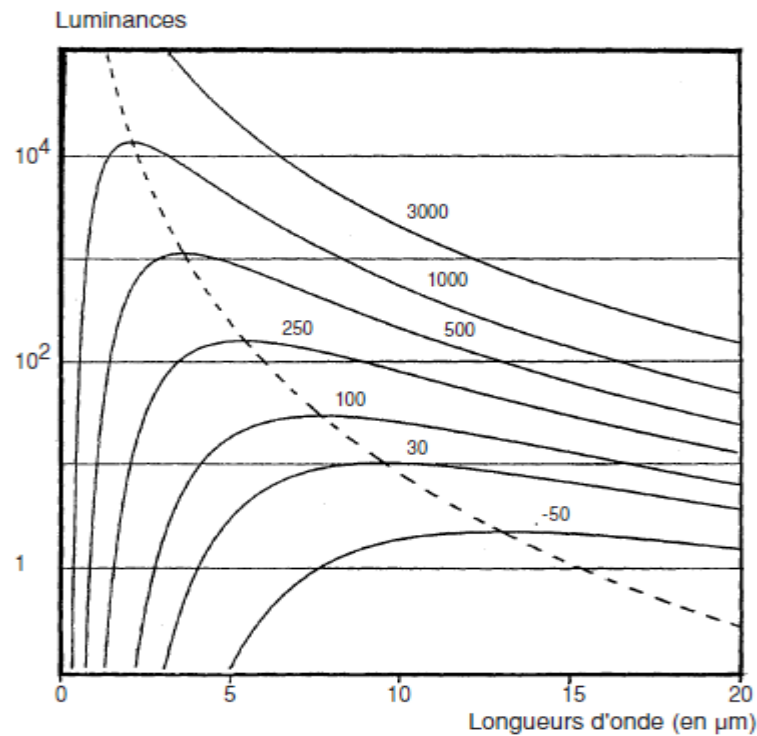
T : Température (K).

Cette loi montre donc d'une part que la valeur de  $\lambda_m$  varie avec la température et par conséquent que la plage spectrale d'émission de rayonnement thermique varie avec la température de la surface émettrice.

Elle montre d'autre part que la valeur de  $\lambda_m$  diminue lorsque la température augmente et par conséquent la plage spectrale d'émission de rayonnement thermique se déplace vers les courtes longueurs d'ondes quand la température de la surface émettrice augmente.

Elle montre aussi qu'un corps à 300 K (corps humain) émet un maximum d'énergie à la longueur d'onde de  $\lambda_m = 9,6 \mu\text{m}$  et que 96 % de son rayonnement thermique est compris entre 4,8 µm et 48 µm [25].

La figure II.12 définit la loi de Wien. Elle indique que lorsque la température croît, le maximum d'énergie émis se déplace vers les faibles longueurs d'onde. Plus simplement, cette loi exprime le fait que la couleur d'un objet chauffé à haute température varie du rouge sombre au blanc [29].



**Figure II.12.** Courbe définie la loi de Wien.

### c. Loi de Stefan Boltzmann

L'énoncé de la loi de Stefan-Boltzmann est: la puissance du rayonnement thermique émis par un corps est proportionnelle à la puissance quatrième de sa température à sa surface et à son aptitude à émettre de l'énergie. On l'obtient par intégration de la loi de Planck [25,30].

$$M = \sigma \cdot T^4 \quad (\text{II.4})$$

Avec :  $\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann  $\sigma = 5,67071 \cdot 10^{-8} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$ .

T: Température absolue du corps noir en Kelvin.

#### II.4.2.3. Emissivité (facteur d'émission)

Tous les corps émet des radiations qui sont absorbées totalement par les particules voisines comme le cas d'un corps noir, ou sont assujetties à une composition des phénomènes : transmission, réflexion, absorption et émission.

Les objets absorbant dans une longueur d'onde  $\lambda$ , une partie notée  $\phi_a(\lambda)$  du flux incident  $\phi_i(\lambda)$ , la partie restante de ce flux incident se décompose en deux :  $\phi_r(\lambda)$  flux réfléchi,  $\phi_t(\lambda)$  flux transmis.

Les coefficients suivant sont alors définis :

Facteur d'absorption :

$$\alpha(\lambda) = \frac{\phi_a(\lambda)}{\phi_i(\lambda)} \quad (\text{II.5})$$

Facteur de réflexion:

$$\rho(\lambda) = \frac{\phi_r(\lambda)}{\phi_i(\lambda)} \quad (\text{II.6})$$

Facteur de transmission:

$$\tau(\lambda) = \frac{\phi_t(\lambda)}{\phi_i(\lambda)} \quad (\text{II.7})$$

Dans un cas particulier d'une émission isotrope, les coefficients précédents ne dépendent pas de la direction. Il vient immédiatement, compte tenu de la conservation de l'énergie :

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (\text{II.8})$$

La loi de kirchoff-draper permet de relier les propriétés d'émission et d'absorption de la matière. On définit alors un coefficient  $\varepsilon(\lambda)$ , appelé émissivité, vérifiant la relation:

$$\varepsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) \quad (\text{II.9})$$

L'émissivité d'un corps noir est égale à 1 [30].

#### II.4.2.4. Equation de la chaleur (Equation fondamentale de la conduction thermique)

Les variations, en fonction du temps, de la température, en tout point d'un milieu homogène isotrope et ne présentant pas de sources de chaleur internes, dans lequel un flux de chaleur diffuse par conduction, sont régies par l'équation de la chaleur suivante:

$$\Delta T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.10})$$

Avec : a : Diffusivité thermique (m<sup>2</sup>/s)

t : Temps (s)

T : Température (K)

Cette équation montre que la répartition de température à l'intérieur d'un matériau soumis à des phénomènes de conduction thermique dépend des coordonnées spatiales du point d'étude, du temps, mais aussi du paramètre de diffusivité thermique. Par conséquent, l'étude de l'évolution spatio-temporelle de la température à l'intérieur d'un matériau soumis à des phénomènes de conduction thermique peut permettre la mesure de chacun des paramètres cités précédemment [25].

La diffusivité thermique est décrite par :

$$a = \lambda / \rho c \quad (\text{II.11})$$

Avec : a : Diffusivité thermique (m<sup>2</sup>/s)

$\lambda$  : Conductivité thermique (W/mK)

$\rho$  : Masse volumique (kg/m<sup>3</sup>)

### II.4.3. Utilisation d'une caméra infrarouge

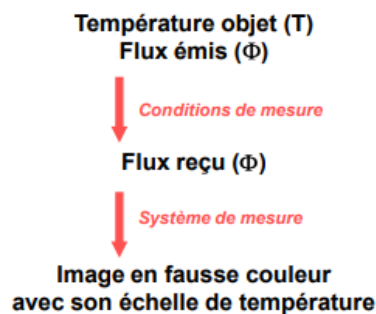
Le progrès technologique rapide a permis le développement de caméras infrarouges de plus en plus performantes. Chaque caméra est dotée d'un manuel précisant ses caractéristiques et la procédure de son utilisation.

#### II.4.3.1. Image thermique (thermo gramme)

Une image est une importante source d'informations de l'objet ou du lieu qu'elle représente. L'intensité de chaque pixel est liée à l'éclairage de la surface observée, à sa réflectance, son orientation, et sa température. Réaliser la mesure d'une de ces grandeurs suppose donc que :

- Les conditions de mesure permettent de lier le flux reçu par le capteur à la grandeur d'intérêt.
- La connaissance du système de mesure soit suffisante pour lier le flux incident à l'intensité du pixel (signal de sortie).

La figure II.13 représente la mesure de la température sans contact avec une caméra thermique (mesure indirecte).



**Figure II.13.** Principe de mesure de température sans contact [28].

#### II.4.3.2. Les détecteurs

La fonction d'un détecteur de rayonnement est d'absorber et de convertir l'énergie du rayonnement incident. Les détecteurs se caractérisent par :

- la sensibilité qui est définie comme le rapport du signal  $V_d$  qu'il délivre au flux  $\phi$  qu'il reçoit :

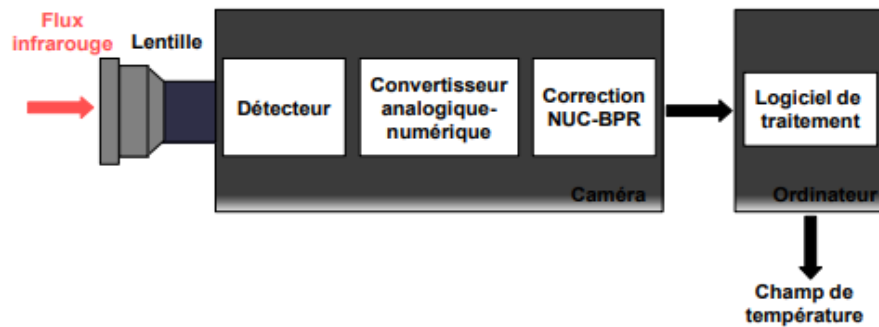
$$s = \frac{V_d}{\phi} = \frac{V_d}{E \cdot A} \quad (\text{V} \cdot \text{W}^{-1}) \quad (\text{II.12})$$

$A$  est la surface du détecteur,  $E$  son éclairement c'est-à-dire le flux surfacique incident.

- Leur temps de réponse induisant une fréquence maximale de fonctionnement.
- Le minimum de flux détectable, défini comme la puissance équivalente au bruit (PEB), flux induisant un signal  $V_n$  égal à la valeur efficace du bruit superposé au signal :

$$\text{PEB} = \frac{V_n}{s} = \frac{E \cdot A \cdot V_n}{V_d} \quad (\text{W}) \quad (\text{II.13})$$

- La détectivité ( $D = 1/PEB$ ) est l'une des grandeurs essentielles caractérisant les performances d'un détecteur. Elle définit la limite de détection. A partir de la détectivité, la détectivité spécifique  $D^*$  on peut comparer des détecteurs entre eux. C'est un élément important de choix pour une caméra thermique. Il s'agit de rechercher la détectivité spécifique maximale.
- D'autres caractéristiques sont plus particulièrement spécifiques aux systèmes infrarouges : les deux principales sont le NETD (Noise Equivalence Température Différence) et le MRTD (Minimum resolvable température différence).



**Figure II.14.** Principe du système de détection [28].

#### II.4.3.3. Problèmes rencontrés

Lors du passage de la théorie (idée physique) à la pratique (mesure), différents problèmes peuvent être rencontrés :

- Les problèmes liés à la connaissance de l'émissivité du matériau : l'émissivité est un paramètre qui intervient linéairement dans l'expression de la puissance radiative émise par un corps. Les spécialistes des propriétés radiatives des matériaux indiquent que ce paramètre d'émissivité est un paramètre très sensible à de nombreux paramètres intrinsèques mais aussi extrinsèques au matériau étudié.
- Les problèmes liés à l'atmosphère : Le deuxième type de problèmes que l'on peut rencontrer lors du passage de l'idée physique à la mesure est lié à l'atmosphère entourant le dispositif expérimental mis en œuvre. En effet, lors d'une analyse par thermographie infrarouge, il existe une certaine épaisseur d'atmosphère entre la scène thermique étudiée et le dispositif de thermographie infrarouge utilisé.
- Les problèmes liés à l'environnement : Le troisième type de problèmes qu'il faut prendre en compte lors d'une analyse par thermographie infrarouge est lié à l'environnement de l'expérience. Ainsi, il existe, autour de l'échantillon analysé un environnement (les murs du laboratoire d'analyse, l'expérimentateur lui-même, ...) qui a une certaine température et qui est donc source de rayonnement thermique. [25]

Compte tenu de ces problèmes, qui peuvent être rencontrés, des précautions particulières sont à prendre afin d'éliminer ou de minimiser l'influence de l'environnement sur les mesures à effectuer.

#### II.4.4. Description et mode de fonctionnement du dispositif de thermographie

Le dispositif de thermographie comporte principalement 4 éléments essentiels :

- ✓ Caméra infrarouge.
- ✓ Boîtier de commande.
- ✓ Système de numérisation et de stockage.
- ✓ Unité de traitement.

#### II.4.5. Etalonnage d'une caméra thermique

La caméra I.R effectue une mesure radiométrique. Le détecteur, jouant le rôle de convertisseur analogique digital du rayonnement incident, convertit chaque photon reçu, dans une plage de longueur d'onde donnée, en une pulse analogique [28].

L'étape de l'étalonnage est une étape très sensible est primordiale pour utiliser la caméra I.R. L'étalonnage c'est établir une relation de correspondance entre les températures des objets observés et les signaux électriques délivrés par le capteur. L'étalonnage réalisé expérimentalement avec un corps noir, où on le place devant la caméra et en relevant en fonction de sa température les valeurs du thermo signal de la caméra [28, 30].

La relation entre le thermo signal et le flux rayonnant de la scène thermique est linéaire, mes par contre la fonction entre la valeur thermique et la température réelle de l'objet elle est non-linéaire (la quantité de rayonnement IR émise par un corps noir croit non-linéairement avec l'augmentation de la température). La loi d'étalonnage définie par le constructeur de la caméra et basée sur la loi de Planck, cette loi relie Le thermo signal  $S$  à la température  $T$  du corps noir [28, 30] :

$$S = \frac{R}{e^{\frac{B}{T}} - F} \quad (\text{II.14})$$

Avec :  $S$  : thermo signal à la sortie de la caméra mesuré en UI (unité iso thermiques).

$T$  : Température absolue de corps noir observé en K.

$R, B, F$  : Coefficients d'étalonnage donné.

## **II.5. Conclusion**

En science des matériaux, différentes techniques d'analyse du comportement mécanique des matériaux sont utilisées. Récemment, compte tenu des développements technologiques, de nouvelles techniques de mesure de champs ont été mises au point. Elles permettent d'étudier les déformations à l'échelle locale avec une meilleure précision. Couplée aux essais de déformation classique, comme la traction, la thermographie infrarouge est l'une des méthodes qui permet d'analyser le comportement thermomécanique des matériaux à l'échelle locale.

Dans le chapitre suivant nous allons analyser, en utilisant la thermographie infrarouge, un essai de traction effectué sur un alliage Al-3.2%Mg.



## **Chapitre III**

# **Analyse d'un essai de traction à l'aide de la thermographie infrarouge**

## **Chapitre III**

# **Analyse d'un essai de traction à l'aide de la thermographie infrarouge**

### **III.1. Introduction**

Dans cette partie, nous allons analyser les résultats d'un essai de déformation en traction uni-axiale réalisé sur un alliage Al-3.2%Mg à température ambiante et à vitesse de traction constante.

En plus de la détermination des caractéristiques mécaniques en traction, nous analyserons l'apport de la thermographie infrarouge dans l'analyse du comportement mécanique à l'échelle locale à partir des champs de températures.

### **III.2. Conditions expérimentales**

L'essai de traction uni-axiale analysé a été réalisé à température ambiante de 27.5°C et à vitesse de traction constante 126 mm/min (vitesse de déformation imposée de  $5 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Le matériau étudié est un alliage Al-3.2%Mg qui se présente sous forme de tôle polycristalline laminée. Les dimensions de la longueur utile de l'éprouvette sont : épaisseur 1.9 mm, largeur 6.26 mm et la longueur 42 mm.

En plus du dispositif de traction, une caméra infrarouge (CEDIP) a été utilisée pour enregistrer le champ de température de la surface de l'éprouvette au cours de sa déformation. La fréquence d'acquisition des images thermiques est de 145 images/seconde. Avec la distance focale des lentilles utilisées, la taille du pixel est de 0.24 mm.

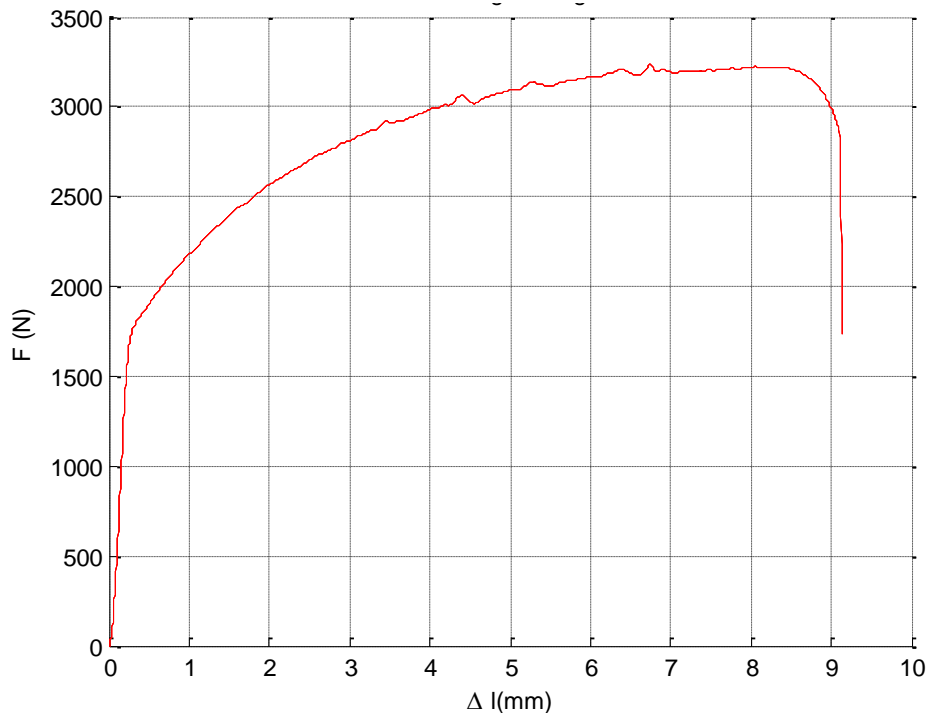
### **III.3. Courbe de traction et caractéristiques mécaniques**

#### **III.3.1. Courbe de traction**

Les données de traction (allongement, charge, temps) sont recueillies sous format numérique (fichier Excel). Puis, en utilisant le logiciel MATLAB, elles ont été exploitées

pour tracer les courbes et pour déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau étudié.

La figure III.1 montre la courbe "charge-allongement" en traction du matériau. L'éprouvette subie d'abord une déformation élastique puis une déformation plastique avant la rupture.



**Figure III.1.** Courbe "charge-allongement" de l'alliage Al3.2%Mg à température ambiante avec une vitesse de déformation de 126mm/min.

Comme la courbe de traction contrainte-déformation conventionnelle,  $\sigma_c = \sigma_c(e)$ , ne tient pas compte des variations des dimensions de l'éprouvette au cours de la déformation, les données de traction ont été corrigées :

$$\text{Déformation vraie : } \varepsilon = \ln(1 + e)$$

$$\text{Déformation vraie : } \sigma = \sigma_c(1 + e)$$

Ainsi, on obtient la courbe rationnelle de traction :  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$

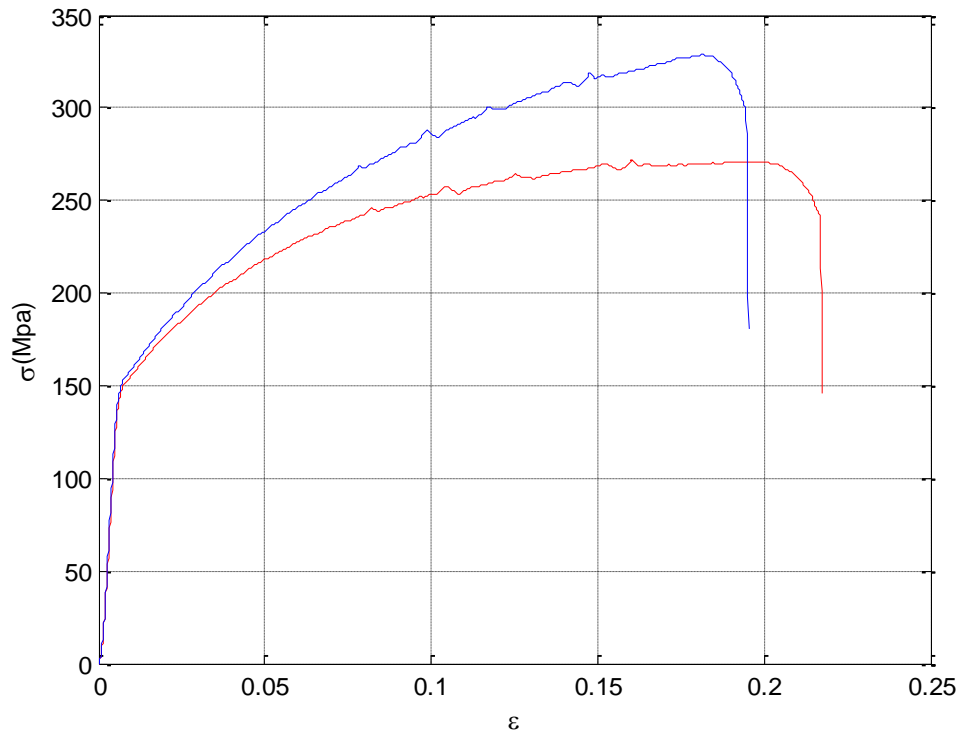
La figure III.2 montre l'allure des deux courbes (rationnelle et conventionnelle).

### III.3.2. Caractéristiques mécaniques

A partir de la figure III.2 on peut distinguer les différences entre les deux graphes (rationnelle et conventionnelle):

- le domaine élastique est presque le même pour les deux graphes.

- à partir de la limite d'élasticité les deux courbes sont séparées, ou on voit que la courbe réelle de la traction est au-dessus de la courbe conventionnelle.
- La striction de l'éprouvette est visible sur la courbe conventionnelle (condition de Considère), elle correspond à la charge maximale supportée par le matériau.



**Figure III.2.** Courbes de traction conventionnelle (en rouge) et rationnelle (en bleu) de l'alliage Al3.2%Mg à température ambiante et à vitesse de traction de 126mm/min.

Les caractéristiques mécaniques du matériau sont déterminées à partir de la courbe de traction rationnelle. De la figure III.2, on obtient :

- Module de Young  $E = 30305.48$  MPa.
- Limite d'élasticité :  $R_e = 145.9$  MPa et  $R_{0.2} = 181.8$  MPa.
- Résistance à la traction :  $R_m = 328.6$  MPa
- Allongement finale ( $\Delta L/L_0$ ) : 0.1953
- Allongement relatif permanent : 0.188

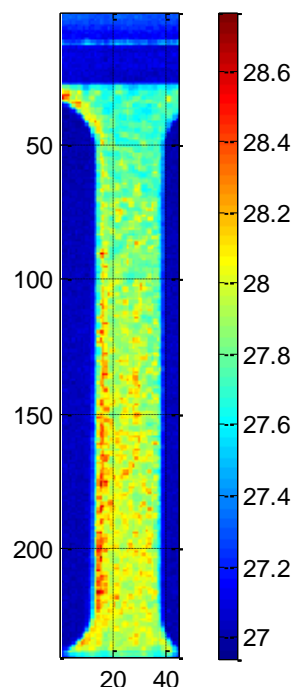
On remarque que la courbe de traction n'est pas lisse, ce qui indique que la déformation n'est pas homogène. Le matériau ne se déforme pas de la même façon d'un endroit à l'autre, il est sujet à des localisations de la déformation. L'essai de traction seul ne nous permet pas de mettre en évidence cet aspect hétérogène de la déformation. Il sera étudié en utilisant la thermographie infrarouge.

### III.4. Apport de la thermographie infrarouge dans l'analyse de l'aspect spatial de la déformation.

Lors de l'essai de traction réalisé, sur l'alliage Al-3.2%Mg à température ambiante avec une vitesse de traction de 126 mm/min, une caméra infrarouge a été utilisée pour l'enregistrement des champs de température de la surface de l'éprouvette au cours de la déformation avec une fréquence de 145 images par seconde. Tout l'essai a été enregistré, de début jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

#### III.4.1. Champs de température et comportement mécanique

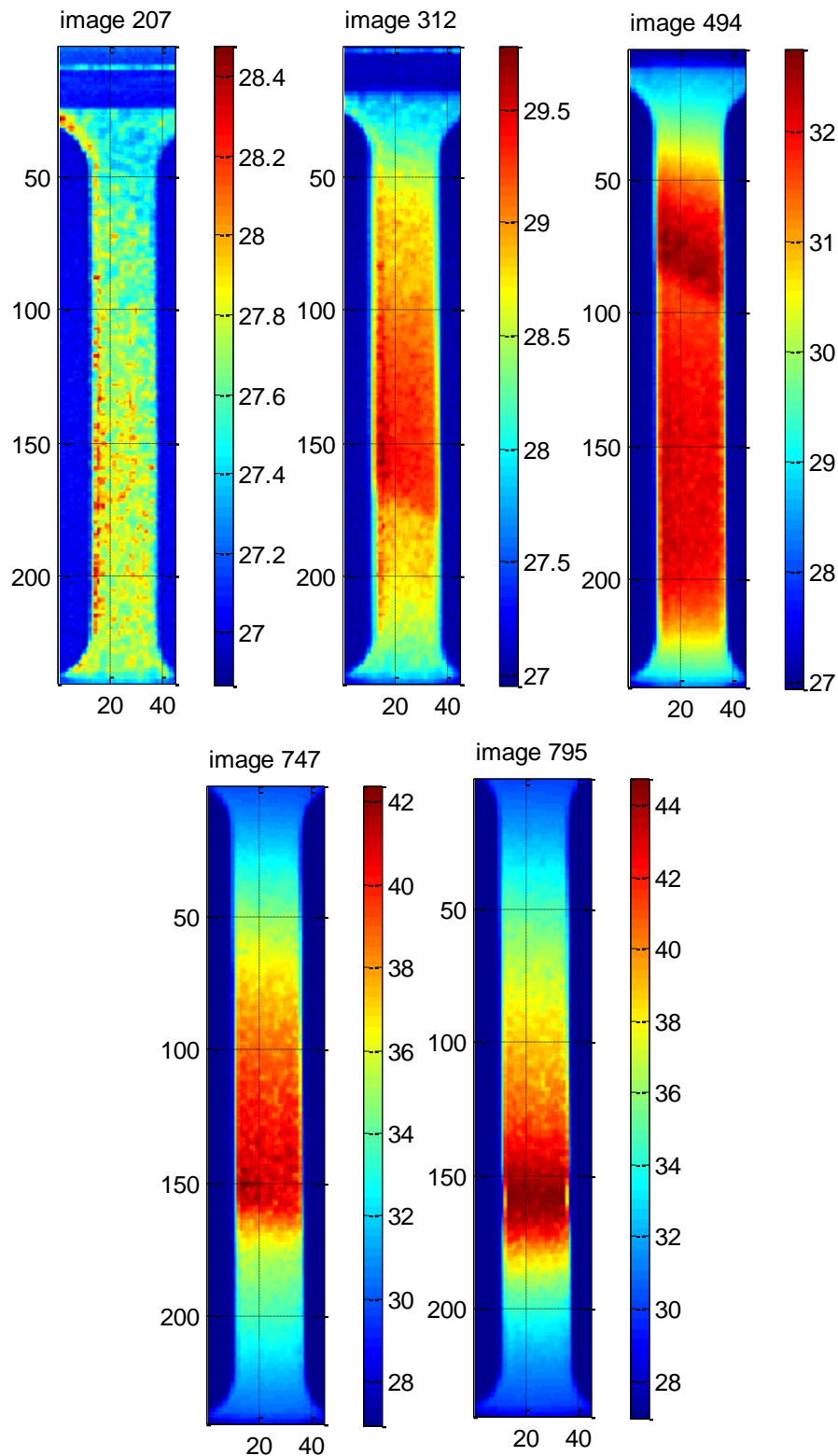
La figure III.3 montre le champ de la température de la surface de l'éprouvette avant déformation. On constate que la température est presque constante sur toute la surface de l'éprouvette. La température de cette éprouvette n'est pas homogène, elle varie approximativement entre 27.5 et 28.4°C. Ceci dénote aussi le caractère hétérogène de la microstructure.



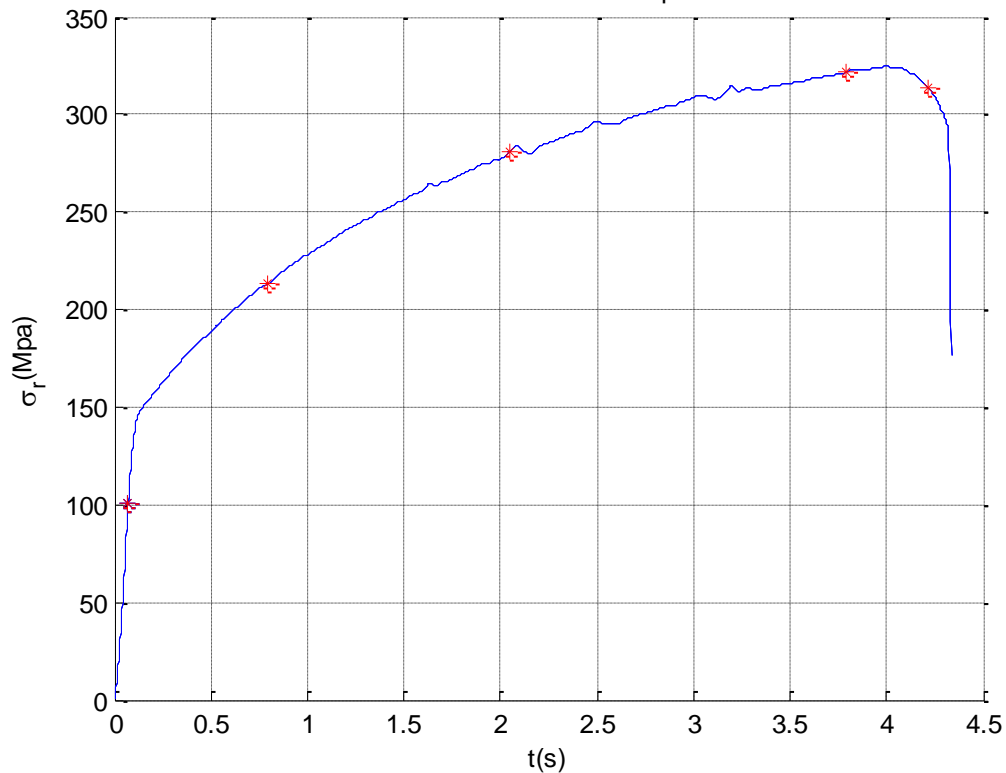
**Figure III.3.** Champ de températures de la surface de l'éprouvette avant déformation.

La figure III.4 montre les champs de température de la surface de l'éprouvette correspondants aux 5 états de contrainte indiqués sur la courbe de traction "contrainte-temps" de la figure III.5. Le premier point est situé dans le domaine élastique, les trois points suivants sont situés dans le domaine élastique et le dernier point est situé dans le domaine de la rupture. On voit que dans la première image la température est presque homogène. Ce qui indique l'homogénéité de la déformation élastique. A partir de la

deuxième image on voit une augmentation de température due à la concentration des contraintes et à l'hétérogénéité de la déformation plastique. Les deux dernières images montrent la striction de l'éprouvette puis sa rupture.



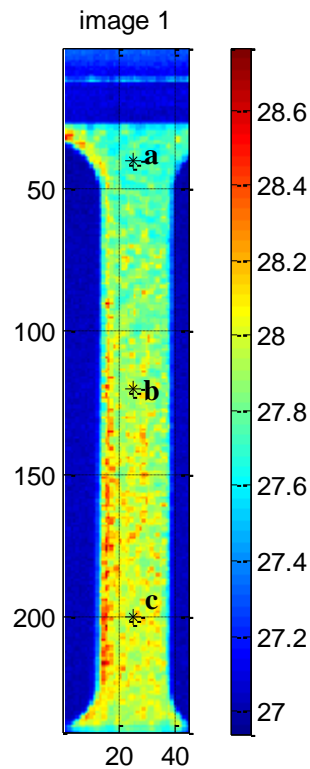
**Figure III.4.** Camps de température de la surface de l'éprouvette, correspondant aux 5 points indiqués par le motif "\*" sur la figure III.5.



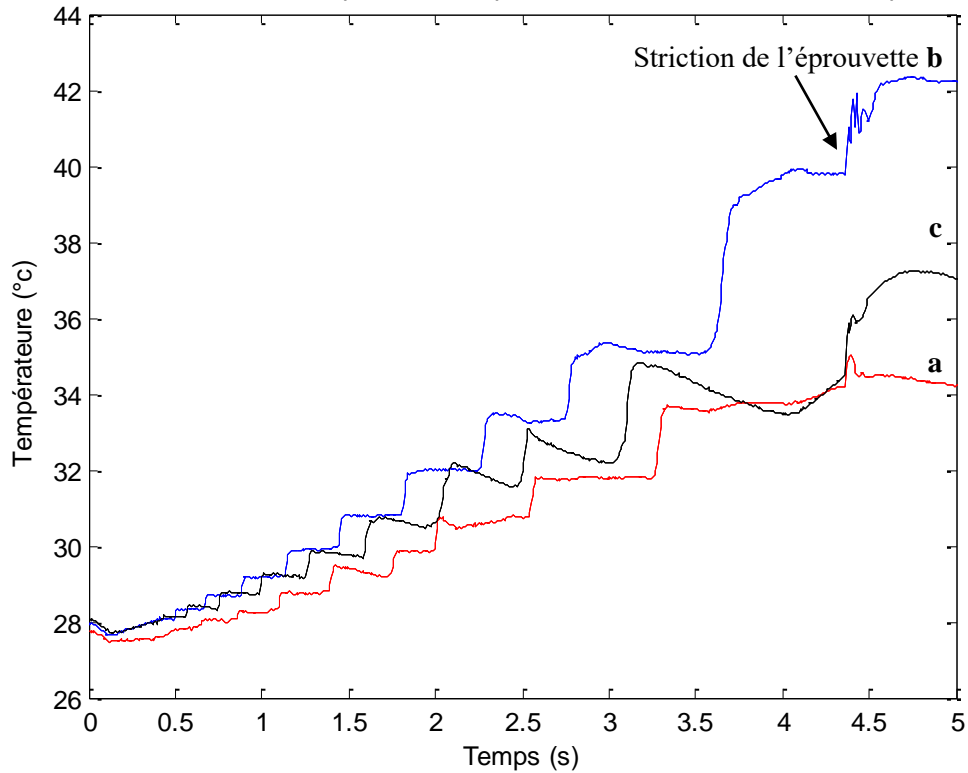
**Figure III.5.** Courbe de traction "contrainte-temps" de l'alliage Al-3.2%Mg à température ambiante avec une vitesse de déformation de 126 mm/min. Les motifs "\*" indiquent des états de contraintes donnés auxquels sont associés les champs de températures de la figure III.4.

### III.4.2. Comportement local

L'analyse avec la thermographie IR nous a permis aussi de suivre l'évolution en fonction du temps de la température locale en tout point de la surface du matériau. La figure III.7 montre l'évolution de la température en fonction de temps aux points a, b et c, indiqués sur la figure III.6. Dans le domaine élastique, la température locale diminue en fonction du temps. Ceci est dû au couplage thermoélastique, toute l'énergie transmise au matériau est utilisée pour sa déformation élastique. Dans le domaine plastique, la température moyenne augmente en au cours de la déformation. Le matériau dégage une partie de l'énergie sous forme de chaleur. Le caractère instable et non homogène des champs de température indique clairement le caractère instable et hétérogène de la déformation plastique. De plus, dans cet essai de traction, nous enregistrons des augmentations brusques de la température (sous forme de marches) correspondants à des localisations de la déformation aux points considérés.



**Figure III.6.** Image de la surface de l'éprouvette indiquant la position des 3 points considérés: a(25,40), b(120,25) et c(200,25).



**Figure III.7.** Evolution de la température aux points a, b et c, indiqués sur l'image de la figure III.6.



### **III.5.Conclusion**

Le comportement mécanique de l'alliage Al-3.2%Mg a été étudié en traction uni axiale à température ambiante (27.5°C) et à vitesse de traction constante de 126 mm/min. En plus de la détermination des caractéristiques mécaniques macroscopiques, l'utilisation de la méthode de la thermographie infrarouge nous a permis d'obtenir le champ de températures de la surface de l'éprouvette et de suivre son évolution pendant la déformation. Cet outil met en évidence le caractère instable et hétérogène de la déformation plastique à l'échelle locale. Il permet de détecter les localisations et de prévenir la rupture du matériau.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Ce mémoire concerne l'étude et la caractérisation de la déformation plastique des matériaux métalliques. Dans la première partie, théorique, nous avons d'abord décrit la microstructure et les mécanismes régissant la déformation plastique des matériaux métalliques. Nous avons étudié le glissement cristallographique des dislocations et leurs interactions. Contrairement aux techniques classiques de caractérisation du comportement mécanique, comme la traction simple, les nouvelles techniques de mesures de champs permettent la caractérisation à l'échelle locale. Ces différentes méthodes d'analyse ont été énumérées et décrites.

Dans la deuxième partie, expérimentale, afin de mettre en évidence l'apport de la thermographie infrarouge dans l'analyse des déformations, nous avons étudié un essai de traction uni axiale réalisé sur un alliage métallique Al-3.2%Mg à température ambiante. Les données sont analysées en utilisant le logiciel MATLAB. Ainsi, les principales caractéristiques mécaniques ont été déterminées à partir de la courbe de traction : module d'Young, limite d'élasticité, résistance à la rupture...etc. La mesure des champs de température de la surface de l'éprouvette pendant la déformation nous a permis de mettre en évidence le caractère instable et hétérogène de la déformation plastique.

Cette étude montre que la thermographie infrarouge a un grand apport dans l'analyse des déformations. Elle peut aider à détecter les défaillances des structures par exemple lors de la localisation de la déformation.

## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1]Y.Bougherira, Thèse de doctorat, Université de Paul Verlaine-Metz(France), 2011.
- [2]B. Jaoul, Etude de la plasticité et application aux métaux, Paris Tech, 2008.
- [3]A. Idrissi el oudrhiri, Thèse de doctorat, Université de Grenoble (France), 2016.
- [4]B. Viguiier,Plasticité : rappels de base et aspects microscopiques, EDP Sciences, 2009.
- [5]Denis ST-LAURENT, ing,modélisation non linéaire Du comportement mécanique des chaussées Avec le module cvcr de CESAR-LCPC, 2008.
- [6]J.C.Charmet, mécanique du solide et des matériaux. Elasticité-Plasticité-Rupture,ESPCI - Laboratoire d'Hydrodynamique et Mécanique Physique.
- [7]J. M.Baes, M.bourcart, C.Lagoutte, Essai de traction, institut des techniques d'ingénieure de l'industrie, 2004.
- [8]R. Moulart, Thèse de doctorat, ENSAM. Paris(France), 2007.
- [9]M. Colombié et coll, Matériaux métalliques,Dunod, 2éme édition, Paris, 2001,2008.
- [10]J.P.Mercier, G.Zambelli. W.Kurz, Introduction à la science des matériaux, presses polytechniques et universitaire romandes, 2002.
- [11] O.Assia, Thèse de doctorat, Université des Frères Mentouri Constantine 1, Algérie, 2017.
- [12]H.Aitamokhtar, Structure et propriétés mécaniques des matériaux, cours Master 1 "Physique des matériaux", Université de Bejaia, 2018/2019.
- [13] D. Hull and D.J. Bacon, "Introduction to Dislocations", Butterworth-Heinemann,Oxford, 2001.
- [14] G.Daveau, Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris,France, 2012.
- [15]R .Thiebaud, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, France, 2006.
- [16] : I. AMIDROR, The Theory of the Moiré Phenomenon, Kluwer AcademicPublishers, 1999.

- [17] C.Badulescu, Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont II, France, 2010.
- [18] J.-C. Batsale, A. Chrysochoos, H. Pron, B. Wattrisse, Analyse thermographique du comportement des matériaux, Issu de l'ouvrage « Mesures de champs et identification en mécanique des solides », 2013.
- [19] : P. Smigielski, Holographie Optique Interférométrie Holographique, Ed. Techniques Ingénieur, 1998.
- [20] S. Domoulin, Thèse de doctorat, Ecole Supérieure d'Ingénieurs d'Annecy-Université de Savoie, France, 2001.
- [21] M. Blétry, Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux, 2006/2007.
- [22] H. Ait-Amokhtar, Thèse de Doctorat, Université de Bejaia, Algérie, 2006.
- [23] R. Moulart, Thèse de Doctorat, Ensam. Paris, France, 2007.
- [24] M.A. Tebbal, mémoire de master, Université de Tlemcen, Algérie, 2011.
- [25] J.I. Bodnar, Le contrôle des matériaux par méthodes optiques infrarouges, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2009.
- [26] Sylvain Patinet, Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud XI (Orsay), France, 2009.
- [27] J. Colombani, J. Laurent, propriétés des matériaux, cours Science des matériaux "Génie Mécanique et Productique", université Claude Bernard Lyon1, France, 2019/2020.
- [28] C. Fillit, Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 2011.
- [29] Institut wallon asbl, La thermographie infrarouge en maintenance prédictive, Ed Ministère de la Région wallonne DGTRE – Service de l'Énergie, Centre hospitalier Saint-Joseph-Espérance.
- [30] L. Hervé, Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, France, 1999.
- [31] A. Raskin, Rappels atomistiques, structure des métaux, des alliages et des céramiques, Université Médicale Virtuelle Francophone, France, 2009/2010.
- [32] S. Perusin, Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [33] M. Vautrot, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France, 2012.

# *Apport de la thermographie infrarouge dans la caractérisation de la déformation des matériaux métalliques*

## **Résumé**

Ce travail est dédié à l'étude du comportement mécanique des matériaux métalliques. En effet, le comportement mécanique d'un matériau métallique est dicté par sa constitution, sa microstructure et les conditions de service.

Après une synthèse bibliographique sur la constitution des matériaux métalliques, le glissement des dislocations et les méthodes d'analyse des déformations, nous avons étudié le comportement mécanique en traction uni-axiale de l'alliage métallique Al-3.2%Mg à température ambiante.

En plus de la détermination des caractéristiques mécaniques moyennes de l'alliage Al-3.2%Mg, on montre l'apport de la thermographie infrarouge dans la caractérisation mécanique des matériaux à travers la mesure des champs de température au cours de la déformation. Les résultats montrent le caractère hétérogène de la déformation plastique. La thermographie infrarouge peut aider à détecter les défaillances des structures lors de la localisation de la déformation par exemple.