

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE  
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE DE BOUIRA



FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES  
APPLIQUEES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Physique

Option :

Physique des Matériaux et Nanomatériaux

Thème

*Effet de la procédure de mise en solution sur la  
résistance mécanique de l'alliage 2017*

Présenté par :

**Mr CHADLI Oualid**

**Mr SADAOUI Hicham**

Devant le jury :

Président : ZITOUNE Hachemi.....MAA.....Univ Bouira.

Examineur : MERRICHE Aberrezak.....MAA.....Univ Bouira.

Examineur : CHAIB Zoubir.....MRA.....C.R

Encadreur : NAIMI Ali .....MCB.....Univ Bouira.

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2016/2017

# *Dédicace*

Nous Dédions Ce Modeste Travail:

À Nos Partants.

À Nos Chers Frères.

À Nos Chères Sœurs.

À Notre Famille.

À Tous Nos Amis (es)

# *Remerciements*

Nous tenons, tout d'abord, à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Monsieur : *NAIMI Ali* qui a assuré la direction de ce présent travail.

Nos remerciements s'adressent également à Monsieur : *ZITOUNE Hachemi* qui nous a honoré en acceptant de présider le jury du présent mémoire.

Nos remerciements s'adressent également à Monsieur : *MERRICHE Aberrezak* et à Monsieur : *CHAIB Zoubir* pour l'intérêt qu'ils ont manifesté et porté à ce travail en acceptant de prendre part au jury du présent mémoire

Nos vifs remerciements vont également à tous les enseignants qui, par leur enseignement, leur encouragement et leurs aides ont contribué à notre formation durant toutes nos études du primaire à l'université. Qu'ils trouvent ici toute notre gratitude.

Nos vifs remerciements vont également à nos familles et amis qui, par leurs prières et leurs encouragements, nous ont aidé à surmonter tous les obstacles durant les années d'études.

Nous tenons, enfin remercier tous ce qui de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

## Sommaire

<b>Les Titres</b>	<b>page</b>
<b>Introduction</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre I : Généralités</b>	
I.1. Différents types d'alliages d'aluminium :	<b>02</b>
I.2. L'alliage 2017	<b>03</b>
I.2.1.Composition	<b>03</b>
I.2.2. Propriétés mécanique de l'alliage 2017	<b>03</b>
I.2.3.La microstructure de l'alliage 2017	<b>04</b>
I.2.4. Applications de l'alliage 2017	<b>05</b>
I.3. La déformation plastique	<b>05</b>
I.3.1. Aspect théorique de la déformation plastique :	<b>05</b>
I.3.1.1. À froid	<b>06</b>
I.3.1. 2. La métallurgie de la déformation plastique	<b>07</b>
I.3.1. 3. La déformation plastique par laminage	<b>08</b>
I.3.1. 4. Aspect métallurgique	<b>10</b>
I.3.2. Effet de la déformation plastique sur la résistance mécanique	<b>11</b>
I.4.Traitement thermique	<b>11</b>
I.4.1.La mise en solution	<b>12</b>
I.4.2. Effet de mise en solution sur la microstructure	<b>13</b>
I.4.3. Maturation	<b>13</b>
I.4.3.1.Effet sur la résistance mécanique	<b>14</b>
I.5 Traitements thermomécaniques	<b>14</b>
I.5.1. Définition	<b>14</b>
I.5.2. L'effet sur la résistance mécanique	<b>15</b>
I.5.3 .Restauration. Recristallisation	<b>15</b>
I.5.3.1 Restauration	<b>15</b>
I.5.3.2 Recristallisation	<b>16</b>
<b>Chapitre 02 : Techniques expérimentales</b>	
II.1 Préparation des échantillons pour la caractérisation	<b>18</b>
II.2 Traitement thermique des échantillons pour 1 heure	<b>18</b>
II.3 La Déformation plastique par laminage à froid	<b>19</b>
II. 4. Micrographie	<b>20</b>
II.4.1. Polissage	<b>20</b>
II.4.2. Attaque chimique	<b>20</b>
II.4.3.Observations micrographiques	<b>21</b>
II.5.Essai de traction.	<b>22</b>
II.5.1.Usinage et préparation des éprouvettes pour traction	<b>22</b>
II.5.2. Essais de traction	<b>22</b>
<b>Chapitre 03 : Résultats et discussion</b>	
III.1.Microstructure Initiale de l'alliage 2017 :	<b>25</b>
III.2 .Effet de la déformation plastique par laminage sur la microstructure de l'alliage 2017 :	<b>25</b>
III.3 .Effet des traitements thermiques après déformation sur la microstructure de l'alliage 2017 :	<b>27</b>
III.3.1.Effet de la température du traitement :	<b>31</b>
III.3.2.Effet de la durée du traitement :	<b>32</b>
III.3.3. Effet du taux de déformation :	<b>34</b>
II.4. Effet des traitements thermomécaniques sur la résistance mécanique de l'alliage 2017 :	<b>36</b>
III.4. 1. Effet de la température du traitement :	<b>39</b>
III.4.2. Effet de la durée du traitement :	<b>43</b>

III.4.3. Effet du taux de déformation :	47
<b>Conclusion</b>	<b>51</b>

## *Introduction Générale*

L'aluminium fait partie des métaux les plus légers, abondants et résistants à la dégradation, grâce à quoi il constitue l'un des matériaux les plus convenables pour l'industrie aéronautique, navale et automobile [1]. Néanmoins, à l'état pur, il est trop ductile et loin de satisfaire les recommandations de la majorité des applications industrielles modernes [2]. L'addition d'éléments d'alliage comme le cuivre, le zinc, le silicium, le manganèse et le magnésium permet d'augmenter sa résistance mécanique et d'obtenir ainsi des alliages aux propriétés très intéressantes dont les domaines d'applications sont très diversifiés [2]. Cependant, la résistance mécanique obtenue par l'ajout d'autres éléments reste insuffisante pour satisfaire les besoins de la technologie moderne [3]. L'une des méthodes les plus adoptées pour augmenter davantage la résistance mécanique de l'aluminium et ses alliages sans nuire réellement aux autres propriétés, notamment la légèreté, est la déformation plastique combinée à des traitements thermiques [4] [5]. En fait, de tels traitements permettent de réduire la taille des grains et augmenter ainsi la résistance mécanique de l'alliage.

Dans ce travail, nous nous envisageons de mettre en évidence l'effet de ces traitements thermomécaniques sur la résistance mécanique de l'alliage d'aluminium 2017 en jouant sur trois paramètres : le taux de déformation, la température et la durée des traitements. Notre étude est basée sur deux techniques de caractérisation complémentaire: la microscopie optique et les essais de traction. La microscopie optique permet d'examiner la microstructure de l'alliage tandis que l'essai de traction donne sa résistance mécanique, ce qui permet donc de faire un lien entre la microstructure et la résistance mécanique de l'alliage 2017.

Ce manuscrit est constitué de trois chapitres en plus d'une introduction et d'un ensemble de conclusions. Le premier chapitre consiste en une synthèse bibliographique sur l'effet des traitements thermomécaniques sur la microstructure et la résistance mécanique des alliages d'aluminium, particulièrement de l'alliage 2017. Le deuxième chapitre résume les différentes techniques expérimentales utilisées, tandis que l'ensemble des résultats et leurs interprétations ont fait l'objectif du troisième chapitre.

# CHAPITRE 01

## Généralités

## I.1. Différents types d'alliages d'aluminium :

Un alliage est un mélange de deux ou plusieurs métaux purs. Il peut être binaire, ternaire ou quaternaire selon qu'il renferme deux, trois ou quatre éléments d'addition [6].

L'aluminium pur ne présente que peu d'intérêt, car ses propriétés mécaniques sont médiocres. Afin d'améliorer ces dernières, on est amené à ajouter certains éléments entrant en solution solide ou formant des précipités avec l'aluminium présent. De nombreuses nuances ont donc été développées afin de satisfaire les nombreux domaines d'applications pour ces alliages. Une classification de ces alliages a été élaborée suivant la nature de l'élément majoritaire ajouté (tableau I.1). L'élément d'addition est choisi en fonction de l'application envisagée, en fait :

- ❖ Le silicium permet d'obtenir d'excellentes propriétés de fonderie comme une augmentation de la coulabilité et une diminution de la criquabilité. La tenue à l'usure, l'étanchéité des pièces et l'allongement à la rupture sont également améliorés;
- ❖ Le magnésium augmente la résistance à la corrosion, aux endommagements, l'allongement à la rupture. A l'opposé les propriétés de fonderie et d'usinabilité sont diminuées
- ❖ Le cuivre augmente les caractéristiques mécaniques à température ambiante, la tenue à chaud et l'usinabilité. Par contre la tenue à la corrosion est diminuée [7].

Série	Principaux éléments d'alliage	Etendue de la teneur (% massique)
1000	Aucun	-
2000	Cuivre	2 à 6
3000	Manganèse	0.5 à 1.5
4000	Silicium	0.8 à 1.7
5000	Magnésium	0.5 à 5
6000	Magnésium et Silicium	-
7000	Zinc et Magnésium	Zn : 5 à 7 Mg : 1 à 2
8000	Fer et silicium	Fe: 0.6 à 2 Si : 0.3 à 1

Tableau I.1 : Séries d'alliage d'aluminium [8].

## ***1.2. L'alliage 2017***

### ***1.2.1. Composition***

L'alliage d'aluminium 2017 fait partie des alliages de la série 2000 dont l'élément d'addition principale est le cuivre (tableau I.2).

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Cr
3.9	0.6	0.6	0.4	0.7	0.25	0.1

**Tableau I.2 : Composition chimique de l'alliage 2017[9].**

Les éléments d'addition, en particulier, les éléments de transitions, jouent un rôle très important dans la métallurgie de l'alliage.

Les éléments d'addition les plus répandus dans les alliages d'aluminium sont le cuivre, le magnésium, le manganèse, le zinc, le fer et le silicium. La présence de magnésium améliore la trempabilité du matériel. Le fer habituellement ajouté pour réduire les effets néfastes des impuretés.

Les éléments Mn et Cr se caractérisent par une faible solubilité dans les alliages d'aluminium. L'introduction de Mn et Cr modifie de façon générale la forme, éventuellement la taille des grains, améliore la ductilité et la ténacité. Mn et Cr sont souvent utilisés dans les alliages d'aluminium pour éviter la recristallisation au cours de la mise en solution [10].

L'addition de Si se caractérise par l'amélioration des caractéristiques mécaniques, la résistance à l'abrasion, corrosion et très bonne aptitude à l'anodisation [11].

Le Zn associé au magnésium par fois au cuivre, il améliore très fortement les caractéristiques mécaniques et l'usinabilité [11].

### ***1.2.2. Propriétés mécaniques de l'alliage 2017***

Etat	Rp0.2 [MPa]	R m [MPa]	A5 [%]	Dureté [HV]
0	70	180	13 - 20	50
T4	230 - 275	380 - 425	10 - 21	115
T6	250	400	dix	130

**Tableau I.3: Propriétés mécaniques de l'alliage 2017[9].**

Etat:

0 - recuit - pour les produits obtenus avec des propriétés spécifiées après la production à chaud.

T4 - traité thermiquement - sursaturé et naturellement vieilli à un état stable.

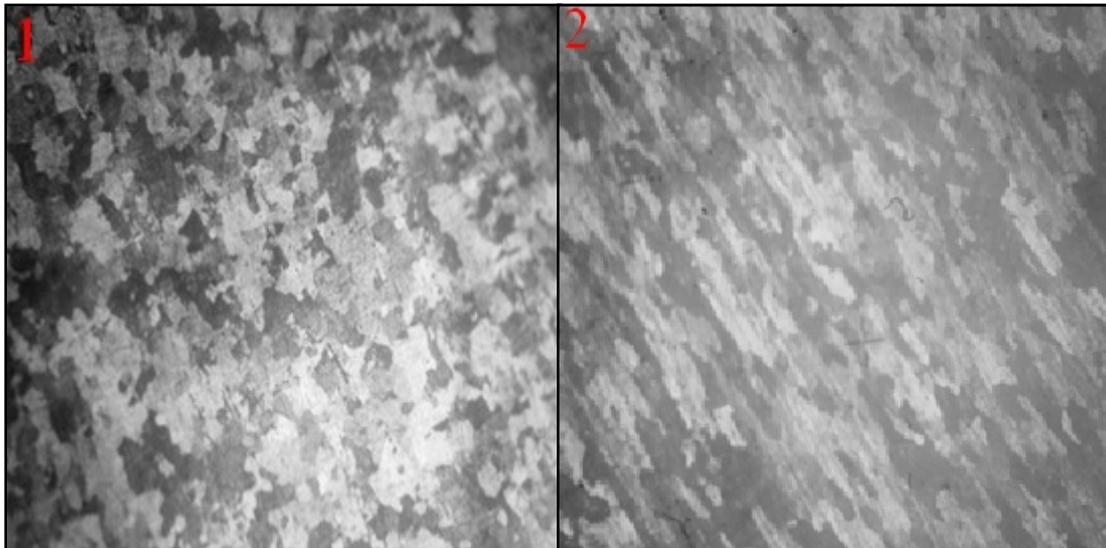
T6 - traitement thermique - sursaturé puis vieilli artificiellement [9].

### ***1.2.3. La microstructure de l'alliage 2017***

Pour que la structure d'un échantillon puisse être observée, les échantillons doivent être préalablement attaqués chimiquement. La structure est alors révélée grâce à la formation d'une couche d'oxyde d'épaisseur variable ou par la réflexion de la lumière variable selon le relief de surface obtenu [12].

La microstructure de l'alliage 2017 peut être observée par une attaque chimique d'hydroxyde de sodium, NaOH, une solution diluée d'acide fluorhydrique, HF ou dans une solution diluée de NaOH. ou soit par une attaque chimique du réactif de **Keller**<sup>1</sup>.

La structure des grains de l'alliage est mieux développée par les deux anciennes solutions.



**Figure I.1 : La microstructure développée par un microscope optique**

- (1) Représente la microstructure après déformation
- (2) Représente la microstructure de l'état initial (brute)

---

<sup>1</sup> un mélange d'acides acidenitrique, acidechlorhydrique et acidedeAcide fluorhydrique

### ***1.2.4. Applications de l'alliage 2017***

- ***Aéronautique*** : L'aluminium et l'aéronautique ont toujours été, et sont encore, étroitement liés. Si l'aéronautique débuta avant 1920 avec les appareils dont les structures étaient en bois, son véritable démarrage ne fut rendu possible que grâce à l'invention en 1903 d'un alliage aluminium-cuivre-magnésium, commercialisé sous le nom de « **duralumin** », aujourd'hui alliage 2017, dont les premières applications furent en 1914, les structures des dirigeables Zeppelin et, en 1917, les structures des avions militaires Breguet 14 construits en 12 000 exemplaires [13].
  
- ***Transports ferroviaires*** : Le gain de poids est d'autant plus intéressant que dans ces matériels où la fréquence des arrêts est relativement élevée afin de réduire la :
  - Consommation lors du démarrage et l'usure lors du freinage (métros récents, remorques d'autorail, etc.).
  
- ***Automobile*** : Les applications sont plutôt ciblées dans ce domaine. Telles que la réalisation des culasses, jantes, radiateur, pistons et carters, étriers de freins, carrosserie, etc [14].

### ***1.3. La déformation plastique***

La plasticité des alliages joue un rôle important dans leurs applications. Elle conditionne de nombreuses opérations de mise en forme des alliages à l'état solide, et pour ces opérations de mise en forme, un écoulement plastique facile et recherché. Les principaux procédés de mises en formes des métaux sont apparus progressivement donnant naissance par la suite à diverses variantes, parfois très nombreuses. Les formes modernes des divers procédés sont le plus souvent apparues récemment pour assurer la production en grande série des pièces à faible coût [15].

#### ***1.3.1. Aspect théorique de la déformation plastique :***

Pratiquée à froid ou à chaud sur un lingot

Toute application d'un effort dépassant la limite d'élasticité engendre une déformation irréversible dite « déformation plastique »; les atomes ne se déplacent plus autour de leur position d'équilibre, ils changent de positions [16].

La déformation plastique apparaît comme étant presque toujours une *déformation de cisaillement*. Considérons la déformation d'un monocristal de structure cubique à l'échelle atomique.

La déformation plastique apparaîtra lorsque, sous l'effet de l'accroissement de contrainte, il y aura glissement irréversible des plans atomiques. Pour cela, il faut couper les liaisons atomiques entre deux plans adjacents et faire glisser une partie du cristal par rapport à l'autre [17].

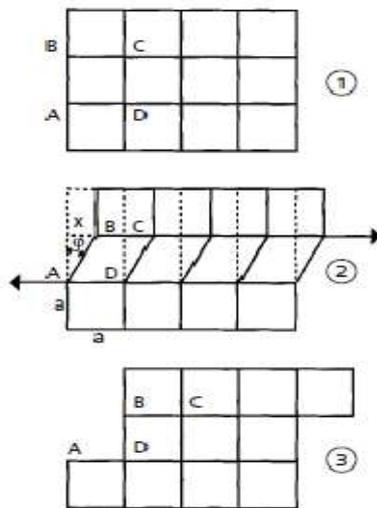


Figure I.2 : Schéma théorique d'une déformation plastique [16].

### I.3.1. 1. À froid

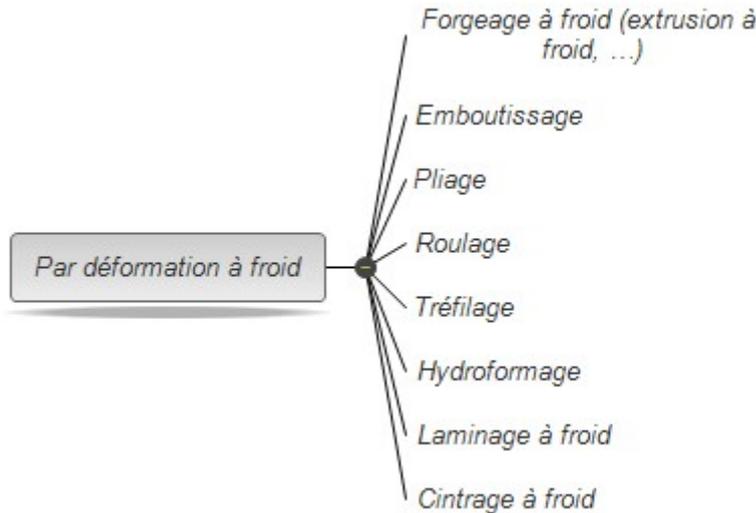
Dans la pratique l'expression à froid signifie à la température ambiante : en général, le matériau n'est pas réchauffé volontairement, ni avant, ni pendant l'opération de mise en forme, cependant la déformation plastique peut engendrer un échauffement important, pouvant atteindre plusieurs centaines de degrés, notamment en usinage. De tels cas relèvent en fait de la déformation à chaud.

De point de vue physique, on considère qu'il existe deux grandes classes de mécanismes microscopiques intervenant dans la déformation plastique de métaux :

- Les mécanismes athermiques, qui ne font pas intervenir l'agitation thermique des atomes, sont en général prédominants pour  $T \leq 0,2 T_f$  ou  $0,3 T_f$  ( $T$  et  $T_f$  températures absolues de déformation et de fusion du métal respectivement).

-Les mécanismes activés thermiquement exigent au contraire l'intervention de l'agitation thermique ; ils sont donc surtout efficaces aux températures élevées ( $T \geq 0,5$ ) ; il faut cependant noter qu'ils interviennent également aux très basses températures.

La déformation à froid est caractérisée par la prédominance des mécanismes athermiques. En particulier, la diffusion y est négligeable, ce qui exclut les phénomènes de recristallisation.



### ***1.3.1. 2. La métallurgie de la déformation plastique***

La métallurgie de mise en forme traite les problèmes de déformation plastique à froid et à chaud, à l'exclusion des procédés impliquant un enlèvement de matière (usinage) et des divers types d'assemblage (soudure, collage, etc.). Elle aborde aussi les questions relevant de la tribologie (frottement et lubrification, usure) ou de la thermique (auto-échauffement, transferts de chaleur métal/outil), qui sont d'une importance considérable dans l'analyse de la plupart des procédés.

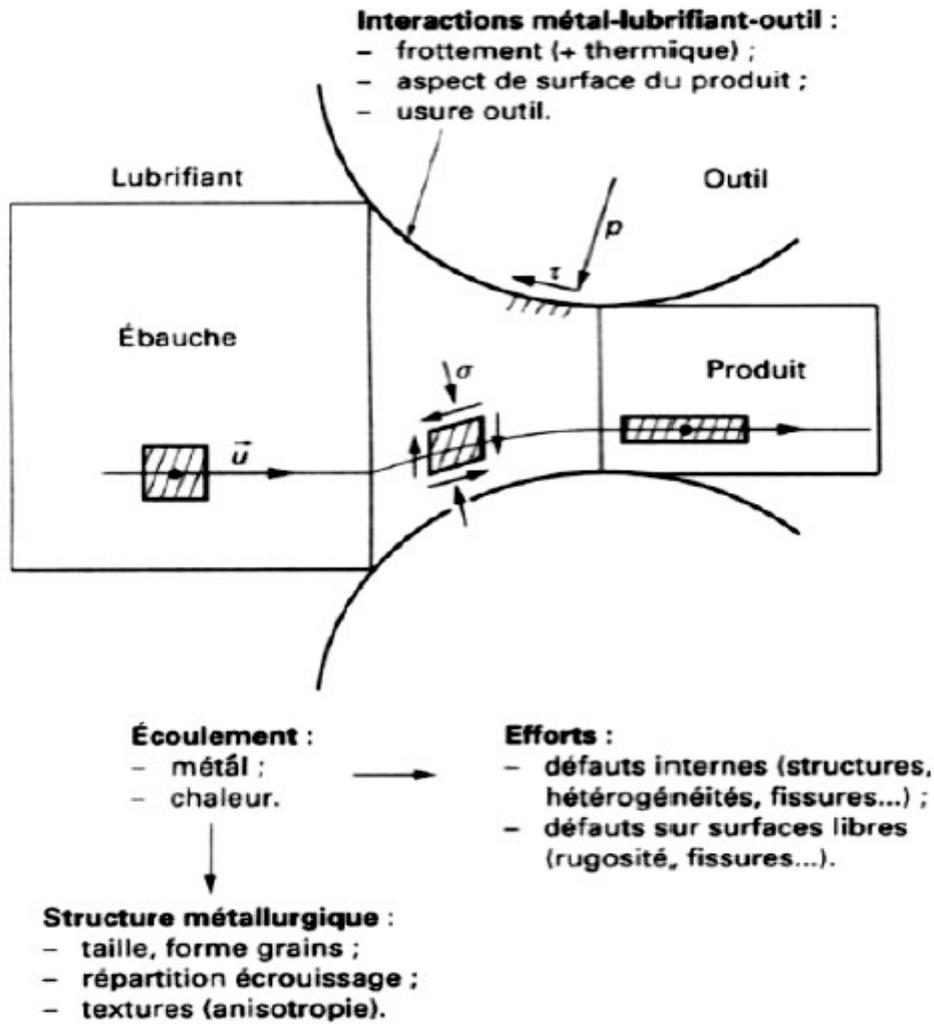


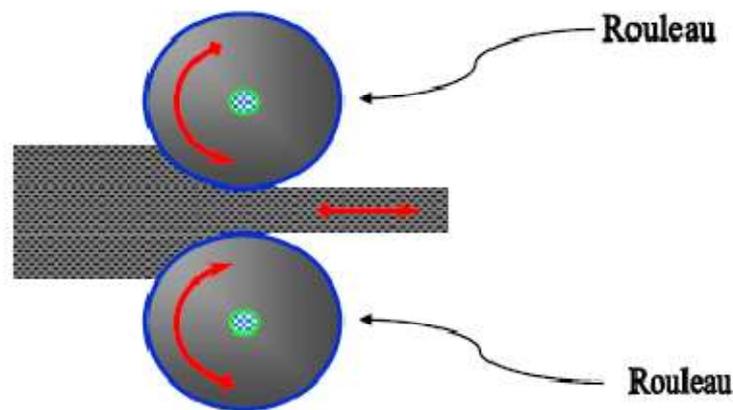
Figure I.3 : Mise en forme par déformation plastique [15].

### I.3.1. 3. La déformation plastique par laminage

Le laminage est un procédé de déformation plastique continue, obtenu par les cylindres du laminoir. Cette déformation est caractérisée par un amincissement et un allongement de la plaque laminée par les passages successifs entre les cylindres. Le coefficient de corroyage est le rapport entre la section du produit avant et après laminage. Le laminage modifie la structure cristalline primaire du lingot, affine le grain, homogénéise la composition et améliore les caractéristiques, surtout dans le sens longitudinal, en raison de l'orientation donnée aux structures cristallines.

Le laminage à chaud permet de réduire rapidement les épaisseurs de plaque de fortes épaisseurs sous haute température, augmentant la ductilité de l'alliage pour éviter les risques de cassures.

Le laminage à froid se fait à température ambiante et nécessite une abondante lubrification ; il permet d'obtenir des tôles ou bandes de grande précision au niveau des caractéristiques dimensionnelles, de l'homogénéité de la structure de l'alliage et de la qualité de surface. Il est utilisé pour la fabrication de tôles minces [18].



**Figure I.4 : Procédé de laminage [7].**

Au cours du laminage, la tôle d'aluminium est happée par les cylindres. Ceux-ci sont rugueux et vont plus vite que le métal à l'entrée de l'emprise. Il se crée donc des forces de frottement qui entraînent l'aluminium par ses deux faces et le forcent à passer entre les cylindres. L'effort appliqué est supérieur à la résistance à la déformation du métal, ses grains s'allongent, son épaisseur diminue et il s'écroute.

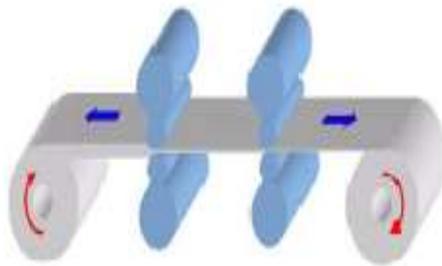
Sa résistance à la déformation augmente, sa limite d'élasticité aussi. Pour l'aluminium et ses alliages, qui ne connaissent pas de transformation allotropique, l'effet des passes de laminage sur l'écroutissage est additif. Une réduction produit le même état métallurgique, qu'elle soit réalisée en une ou plusieurs fois avec un laminoir puissant ou plus ancien. Le coût de fabrication ne sera, bien sûr, pas identique. Lorsque l'écroutissage atteint une valeur critique, propre à chaque alliage, apparaît le risque de criques et de casse de la bande sous l'effet des tractions appliquées. Il n'est donc plus possible de diminuer l'épaisseur par simple laminage.

Le métal est alors maintenu à une température bien définie pendant un temps déterminé pour permettre la recristallisation totale ou partielle. La résistance à la déformation et la limite

d'élasticité diminuent, le risque de criques s'annule et les opérations de laminage peuvent reprendre. Les taches susceptibles d'apparaître pendant le recuit doivent être évitées par un bon essorage des bandes, le choix et la propreté des lubrifiants, le contrôle du taux d'oxygène et d'humidité dans les fours [19].

Le laminage à froid provoque un écrouissage du métal. Le laminage ne peut se poursuivre au-delà de la limite de rupture, par ailleurs l'écrouissage peut entraîner un dépassement des capacités de puissance du système de laminage à froid.

Le laminage à froid est généralement réalisé sur laminoirs réversibles multicylindres, où plusieurs cages se succèdent, on parlera d'un train de laminage. Deux bobineuses sont disposées de chaque côté des cages pour assurer la traction et contre-traction de la bande. Le laminage s'effectue sous film d'huile minérale afin de faciliter l'écoulement du métal, éliminer la chaleur produite par le laminage et lubrifier les équipements internes de la cage de laminage [15].



**Figure I.5 : Train de laminage [15].**

### ***1.3.1.4. Aspect métallurgique***

La déformation élastique de tout matériau cristallin se produit par distorsion réversible de son réseau. La déformation plastique se produit alors par ruptures et reconstructions des liaisons métalliques qui assurent la continuité du réseau cristallin, phénomènes nécessitant en théorie une énergie considérable. La présence des dislocations et leur déplacement suivant des plans privilégiés vont permettre de réaliser les ruptures et reconstructions des liaisons, non pas simultanément mais de façon discrète, réduisant ainsi de façon considérable l'énergie stockée sous forme de dislocations [15].

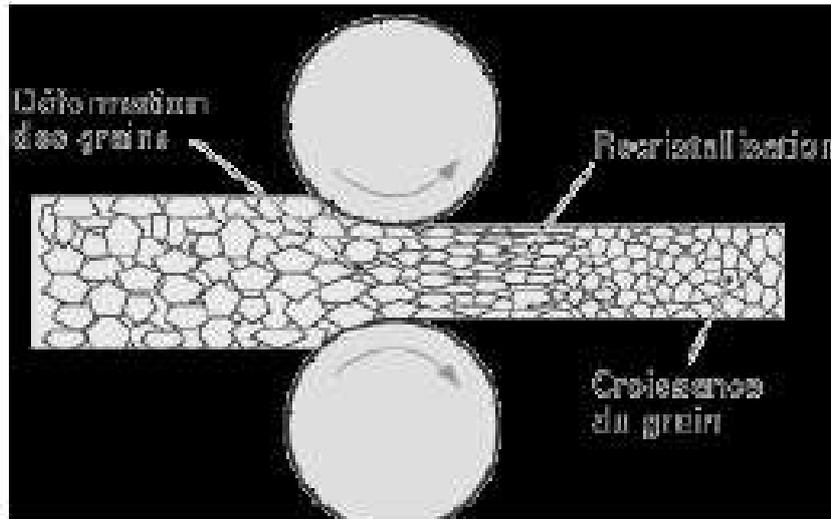


Figure I.6 : Train de laminage [15].

### ***1.3.2. Effet de la déformation plastique sur la résistance mécanique***

La déformation plastique d'un alliage d'aluminium a un impact important sur ses propriétés mécaniques et électriques. Il a été démontré que la dureté et la résistance augmentent par rapport à la réduction de l'épaisseur. Une amélioration substantielle de la ténacité, la force, la dureté et la faible résistance au flux [20].

Lorsqu'un alliage a subi une déformation plastique, il est dit écroui. Le niveau de déformation caractérise le taux d'écrouissage. Inversement, la mise en forme par déformation plastique entraîne nécessairement un stade d'écrouissage d'alliage plus ou moins important.

D'autre part, l'augmentation du taux de lacunes entraîne une plus grande résistivité électrique. Ces propriétés sont utilisées pour augmenter ou régler les caractéristiques mécaniques des produits [13].

### ***1.4. Traitement thermique***

Un traitement thermique est une technique très utilisée pour l'amélioration des propriétés mécaniques d'un alliage sans affecter sa composition chimique. Certains éléments (Mg, Cu, Ni, etc) forment des précipités de dureté différente qui augmentent la résistance mécanique de l'alliage. Il peut également avoir comme effet d'améliorer:

- le comportement à la fatigue et au fluage.
- les caractéristiques de traction.
- la susceptibilité à la corrosion.

- la stabilité dimensionnelle.
- l'usinabilité etc.

Du point de vue de l'utilisation, il y a deux buts majeurs lors de l'exécution d'un traitement thermique [21]:

- **le durcissement**, obtention des caractéristiques mécaniques finales par durcissement structural: traitement complexe comportant la mise en solution et la maturation ou le vieillissement;
- **l'adoucissement**, rétablissement de la malléabilité, de l'aptitude à la déformation plastique: les recuits [21].

### I.4.1. La mise en solution

Elle consiste en un maintien à une température suffisamment élevée dans le domaine monophasé afin de dissoudre, c'est-à-dire mettre en solution solide, les éléments d'addition présents dans l'alliage en phases dispersées [13]. Le traitement est achevé par une trempe à l'eau, à l'air ou à l'huile, selon le but recherché. La trempe permet d'éviter la formation de précipité pendant le refroidissement et de préserver ainsi la solution solide formée lors de la mise en solution.

La mise en solution consiste à dissoudre les précipités massifs (à les remettre en solution) dans l'alliage. Puisque la solubilité augmente avec la température du solvant (matrice), la mise en solution est faite à haute température (environ 10 °C sous le solidus). Après la mise en solution, on obtient une solution solide homogène (aucun précipité) [22].

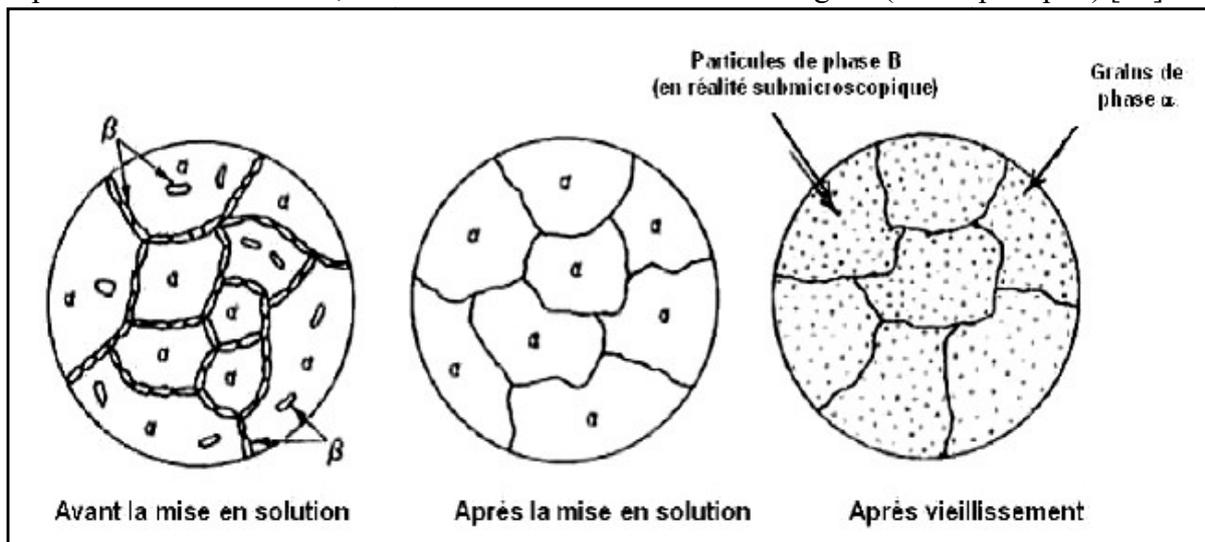


Figure I.7 : La mise en solution [22].

### ***1.4.2. Effet de mise en solution sur la microstructure***

La mise en solution peut produire un certain nombre de changements structurels sur un alliage tels que [13] :

- La dissolution des particules.
- Grossissement des particules.
- Les changements de la dislocation de la distribution et la densité.
- Le développement et la migration des sous-grains et les joints des grains.

Nous pouvons dire aussi que la mise en solution a un autre effet est celui d'homogénéiser la composition chimique de l'alliage et de saturer totalement la solution solide [23].

### ***1.4.3. Maturation***

La maturation permet une évolution de la structure métallurgique à température relativement basse (souvent température ambiante) [24]. Lors de cette phase de maturation, l'alliage durcit progressivement par la décomposition de la solution solide au profit de la formation de petits amas d'atomes de soluté appelés zones de Guinier-Preston (zones GP) en très grande densité.

Cette phase de durcissement peut être accompagnée d'un écrouissage (opération de traction contrôlée) de 1 à 3 % de déformation permanente du matériau qui permet de relaxer les contraintes résiduelles et d'augmenter la densité de lacunes, sites privilégiés pour la germination des précipités durcissants [25].

La maturation demande de longues périodes avant d'obtenir un durcissement appréciable, il faut comprendre qu'une maturation réalisée à des temps longs de maintien ou à haut température peut conduire à la perte des propriétés mécaniques.

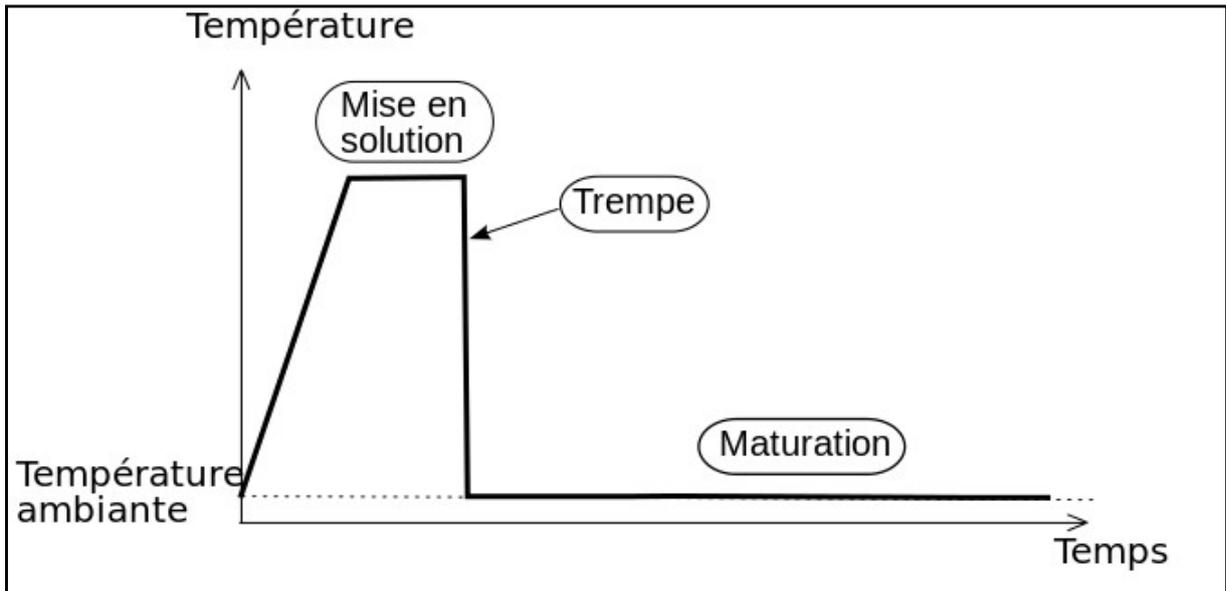


Figure I.8 : Cycles de traitement thermique des alliages. [24]

#### ***1.4.3.1. Effet sur la résistance mécanique***

La mise en solution améliore la ductilité et augmente faiblement la résistance des pièces coulées. Pour développer au maximum les propriétés mécaniques, on applique un traitement de maturation.

La maturation, réalisée adéquatement, est toujours accompagnée d'une augmentation de la résistance à la traction, de la dureté et de l'allongement. Un vieillissement ultérieur provoque une augmentation de la résistance mécanique et de la dureté ainsi qu'une diminution plus ou moins importante de l'allongement. Cette chute de la ductilité peut être suffisamment importante pour rendre les alliages fragiles (cassants).

### ***1.5. Traitements thermomécaniques***

#### ***1.5.1. Définition***

Méthode récente permettant d'obtenir des caractéristiques exceptionnelles car elle combine la modification de structure par déformation mécanique et déformation due à l'apport de chaleur [12].

C'est aussi un procédé métallurgique qui combine un processus de déformation mécanique ou plastique comme la compression ou le forgeage, le laminage, etc. avec des procédés thermiques comme le traitement thermique, l'extinction de l'eau, le chauffage et le refroidissement à différents taux en un seul procédé [26].

### ***1.5.2. L'effet sur la résistance mécanique***

Le traitement thermomécanique a un effet par rapport au vieillissement artificiel des alliages d'aluminium, en particulier il améliore la limite d'élasticité, cette dernière augmente avec un pourcentage considérable par rapport à l'état vieilli.

Cette méthode peut aussi améliorer d'autres propriétés mécaniques comme la force, l'allongement et la ténacité statique [27]. Le traitement thermomécanique induit une amélioration de la résistance à la traction, ainsi qu'une augmentation de la plasticité [28].

### ***1.5.3. Restauration. Recristallisation***

L'état écroui est évidemment un état métastable, le nombre de défauts introduits tels que dislocations ou lacunes étant très supérieur à sa valeur à l'équilibre. Par conséquent, une augmentation de température conduit au retour vers l'état stable ; cette évolution se fait selon plusieurs mécanismes en fonction de la température [13].

#### ***1.5.3.1 Restauration***

C'est un traitement qui est effectué à une température inférieure à celle de la recristallisation. La restauration est définie comme le rétablissement plus ou moins partiel des propriétés physiques ou mécaniques d'un alliage écroui sans modification apparente de sa structure [29].

La restauration se produit dans l'alliage déformé, sans migration des joints à grand angle. Au cours de cette étape, on n'a pas de création de nouveaux grains, mais seulement une réduction du nombre de défauts atomiques, lacunes et dislocations et réarrangements de ceux-ci en nouvelles configurations plus stables. La restauration permet un rétablissement partiel des propriétés physiques ou mécaniques d'alliage écroui [30].

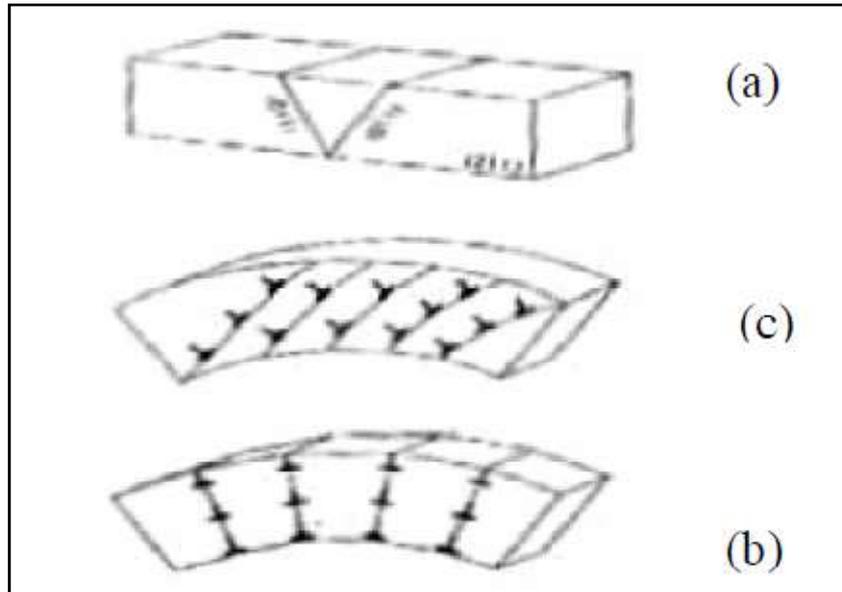


Figure I.9: Evolution de la microstructure au cours de la restauration [29].

- a) Orientation de l'éprouvette.
- b) Glissement.
- c) Polygonisation.

### ***1.5.3.2. Recristallisation***

Au cours du traitement de recristallisation, il se forme de nouveaux grains et donc une nouvelle structure cristalline, par germination et croissance. Cet effet est appelé recristallisation et conduit à la restauration des propriétés mécaniques avant déformation à froid.

Pour qu'une recristallisation ait lieu, différentes conditions préalables doivent être satisfaites. Il existe un taux d'écroutissage critique en dessous duquel le phénomène de recristallisation n'est pas possible. Ce taux dépend de l'alliage utilisé et de la température du traitement thermique. De même, une température minimale est indispensable. Cette dernière dépend de l'alliage, du taux d'écroutissage et de la durée du traitement thermique [12].

Il existe deux types de recristallisation :

- Une recristallisation primaire (germination et croissance normale)
- Une recristallisation secondaire (croissance anormale)

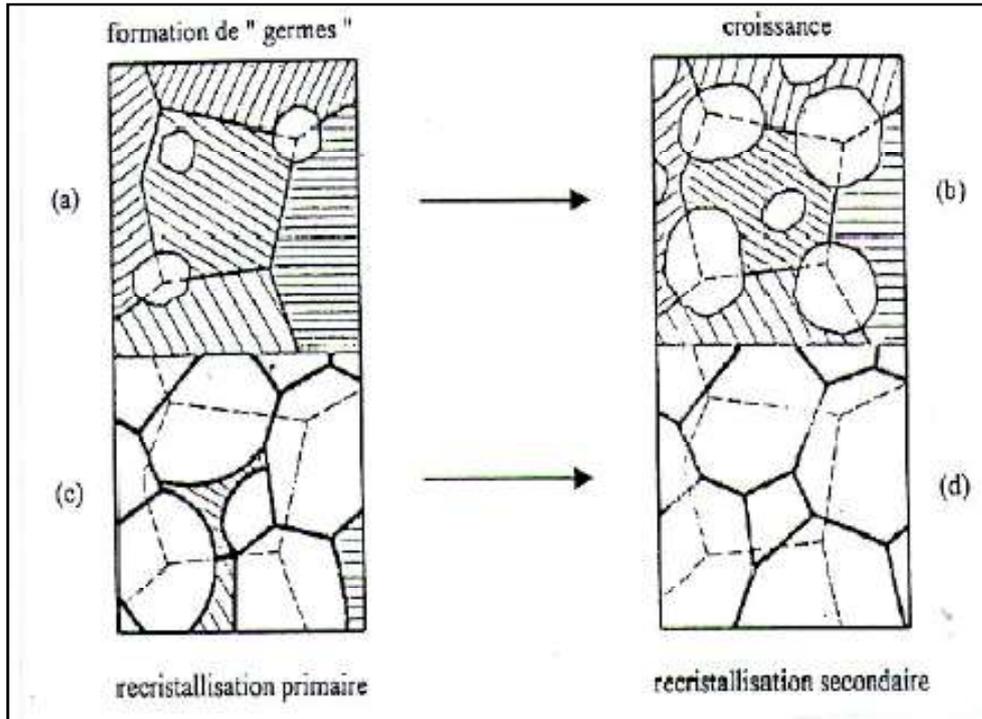


Figure I.10 : Schéma de la recrystallisation [29].

# CHAPITRE 02

## Techniques expérimentales

### II.1. Préparation des échantillons pour la caractérisation

L'alliage 2017 a été reçu sous forme d'une tôle de 120 mm d'épaisseur de 3.9 à 5 mm, après on a été les découpés en morceaux dont les dimensions comme montre la figure II.1.

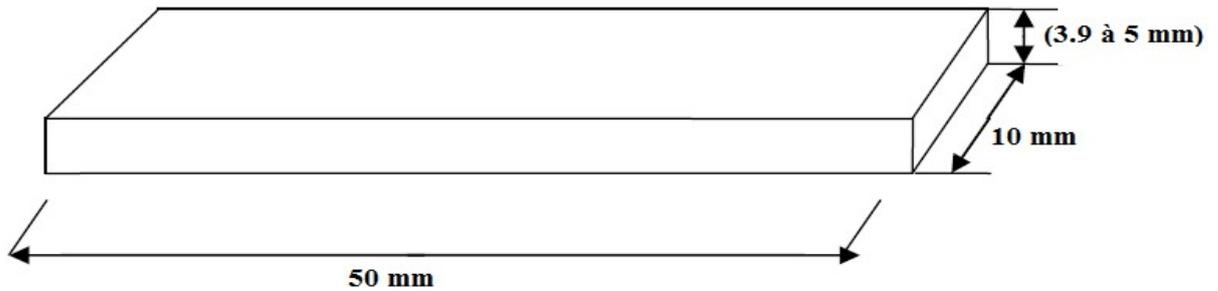


Figure II.1 : Echantillon à l'état initial

Pour réduire les risques de fissuration, un traitement a été fait sous température de 505°C pendant une heure de 10 : 20 à 11 : 20, Ensuite Afin de donner aux échantillons découpés la même épaisseur (3mm), on a les a laminé, Après laminage, les échantillons ont subi un traitement de mise en solution de 2h à 505°C de 13:30 à 15 :30 Suivi d'une trempe énergétique à l'eau (25°C).

### II.2. Traitement thermique des échantillons pour 1 heure

Tous les échantillons ont subi le même traitement thermique à 500 °C pour 1 heure, Nous représentons le cycle de traitement thermique appliqué dans la Figure II.2

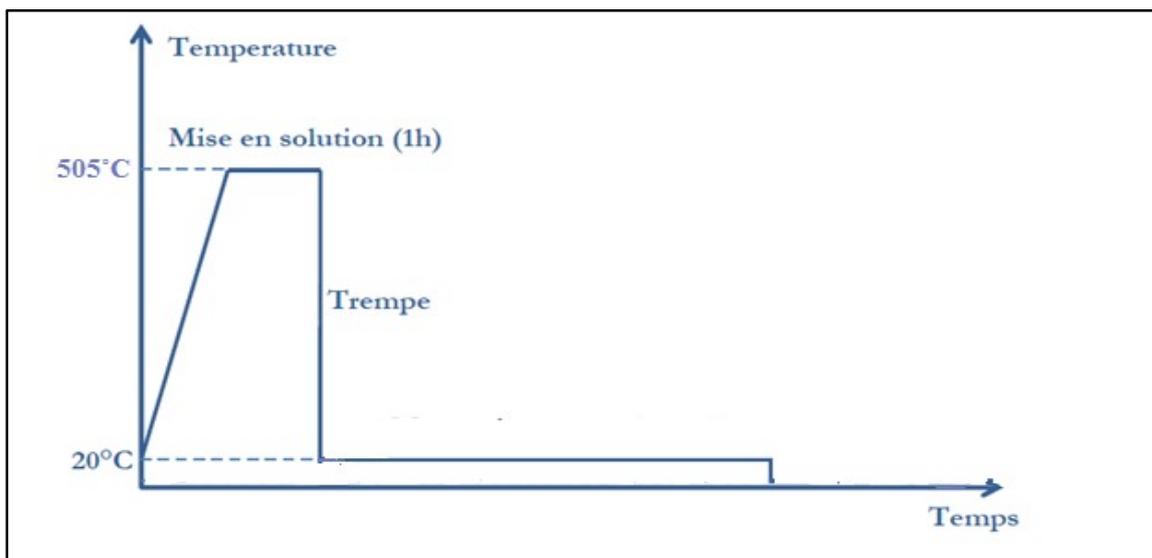


Figure II.2: Traitement thermique appliqué aux échantillons avant la déformation plastique.

Le traitement thermique réalisé est composé d'une mise en solution pendant une heure (1h) à 505°C dans un four électrique, suivi d'une trempe dans l'eau (de 20 à 25°C). Pour améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux, soit l'homogénéisation, décomposition et la stabilisation des microstructures de l'alliage.

Ces conditions ont été choisies afin d'obtenir un bon compromis résistance mécanique/ductilité et puis stabilité des phases. Parmi les traitements thermiques, seul le traitement à 500°C pour une heure est susceptible de favoriser une assez bonne stabilité microstructurale pour des longues durées d'utilisation de ces matériaux à des températures inférieures à 500°C.

### ***II.3. Déformation plastique par laminage à froid***

Le laminage a été réalisé sur un laminoir type FOV (figure II.3) dont le diamètre des cylindres de 13,5 cm et leur vitesse de rotation est de 95 tours /mn. Le laminage a été fait à froid et en multi passes. Le taux de réduction de l'épaisseur des échantillons par passe est de 0,138mm.



**Figure II.3 : Laminoir utilisé dans la déformation plastique**

## II. 4. Micrographie :

### II.4.1. Polissage :

Les observations micrographiques de l'alliage nécessitent une surface miroir obtenue par un polissage soit mécanique soit électrolytique. Nous nous sommes opté pour le polissage mécanique pour sa simplicité et disponibilité du matériel. Celui-ci a consisté en une série consécutive de polissage au papier abrasif de granulométrie de plus en plus fine (220,600,1000,2000,5000) suivi à chaque fois d'un nettoyage de surface à l'eau à la fin de chaque étape de polissage pour enlever les plus grosses particules qui pourraient griffer la surface.



Figure II.4 : Machine de polissage mécanique

### II.4.2. Attaque chimique

Dans certains cas les échantillons peuvent être examinés sans l'attaque chimique, la micrographie révélée directement après polissage. Cependant, dans notre cas, la révélation de la microstructure nécessite une attaque chimique. En fait, les échantillons polis et débarrassés des dernières traces d'abrasif par lavage à l'eau et un séchage avec un chiffon doux, ont subi une attaque chimique par le réactif de Keller dont la composition est la suivante:

Eau distillée 9 ml

Acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) 0.25 ml

Acide chlorhydrique (HCl) 0.15ml

Acide fluorhydrique (HF) 0.1 ml

L'attaque consiste en l'immersion de la surface polie dans la solution. La durée de l'immersion varie entre 5 et 15 secondes.

### II.4.3. Observations micrographiques

Les observations au microscope optique nous a permis de suivre l'évolution de la microstructure des échantillons (taille des grains) conséquent des traitements thermomécaniques réalisés. Le microscope utilisé est de type Size équipé de 5 grossissements 50, 100, 200, 500 et 1000.

L'échantillon à caractériser par observations optiques doit remplir certaines conditions telles que :

- 1- la planéité de la surface à observer pour que l'objectif en donne avec un agrandissement bien choisi une image entière et nette.
- 2- La surface doit être en général, bien polie et chimiquement traitée afin que les rayures ne masquent pas ce que l'on veut observer.



**Figure II.5 : Microscope optique utilisé**

### II.5. Essais de traction.

Nous avons eu recours à des essais de traction pour mettre en évidence l'effet des différents traitements effectués sur la résistance mécanique de l'alliage 2017.

#### II.5.1. Usinage et préparation des éprouvettes pour traction :

Les essais de traction nécessitent de donner aux échantillons une forme bien définie (figure II.6).

Pour bien donner la forme demandée aux échantillons, on a utilisé une lime pour métal, après avoir dessiné la forme sur l'échantillon nous avons pris la lime et découpé, en suivant la forme, et tout ça sous la présence de l'eau vu que la température de l'échantillon augmente d'une façon rapide, ce qui n'est pas acceptable pour nous.

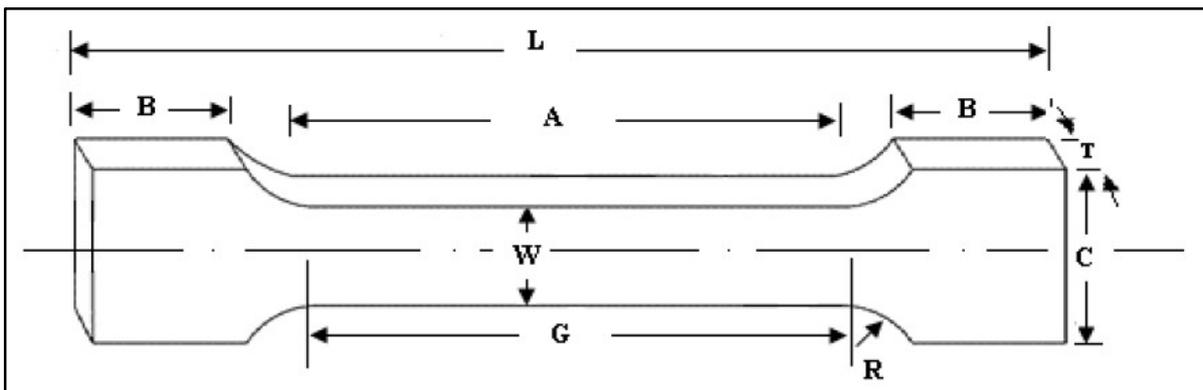


Figure II.6 : Epreuve de traction

$B= 10 \text{ mm}$ ,  $A= 40 \text{ mm}$ ,  $G= 20 \text{ mm}$ ,  $L= 60 \text{ mm}$ ,  $C= 10 \text{ mm}$ ,  $T= 1.5 \text{ mm}$  et  $0.75 \text{ mm}$ ,  
 $W= 5 \text{ mm}$ ,  $R= 1.25 \text{ mm}$

#### II.5.2. Essais de traction

L'essai de traction est effectué sur une machine automatisée au niveau du ZWICK-ROELL Z100, dotée d'une capacité de mesure 100 KPa et d'un extensomètre de longue course ( $L_0 = 200 \text{ mm}$ ) ; elle est commandée et pilotée par un ordinateur.



**Figure II.7 : Machine de traction INSTRON 5969.**

C'est un essai dans lequel on tire sur une éprouvette en imposant une vitesse de déformation constante.

On reporte alors la force  $F$  en fonction de l'allongement de l'éprouvette; ou mieux, la contrainte  $\sigma = F/S_0$  en fonction de la déformation ou allongement relatif  $\epsilon = \Delta/l_0$

Avec :

$S_0$  = aire de la section initiale de l'éprouvette

$l_0$  = longueur initiale de l'éprouvette

Les essais de traction permettent d'évaluer des grandeurs caractéristiques telles que la limite d'élasticité, l'allongement contrainte maximale, capacité d'érouissage et ductilité.

Parmi les différents types de sollicitations simples (qui se retrouvent combinées dans toutes les autres), nous allons décrire le cas de la traction simple (ou extension). Dans ce qui suit, nous ferons abstraction du temps pour ne considérer que des actions permanentes. Un objet (fil, corde, poutre...) travaille en traction lorsqu'il est soumis à deux forces égales et opposées qui tendent à l'allonger :

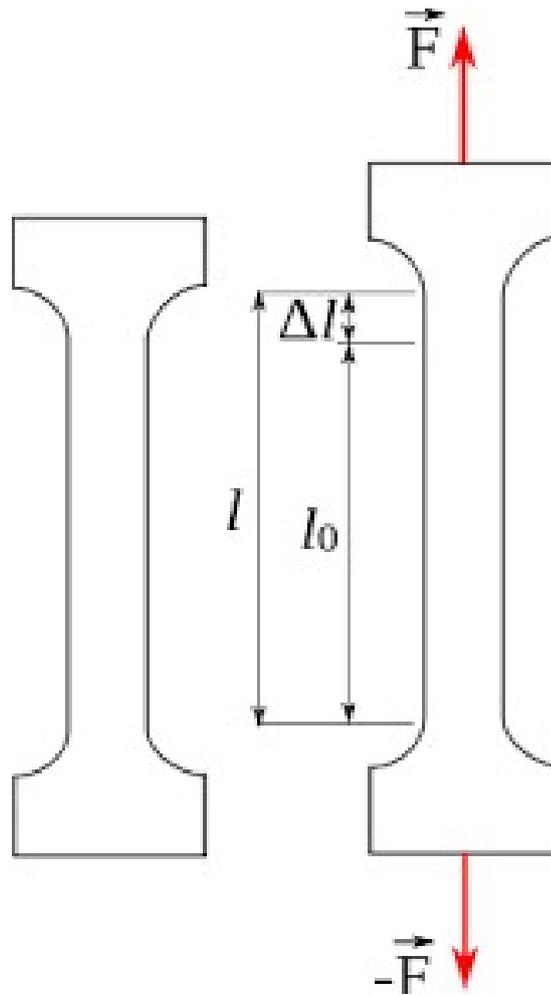


Figure II.8 : Technique de l'essai de traction

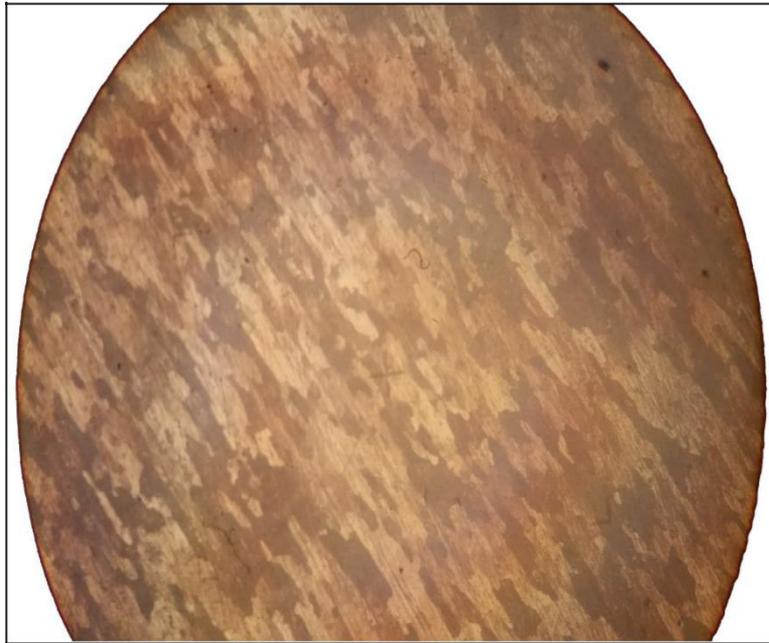
# CHAPITRE 03

## Résultats et discussion

### ***III.1. Microstructure Initiale de l'alliage 2017 :***

L'alliage 2017 a été reçu dans l'état T3 correspondant à un alliage laminé et mûri. Dans cet état, l'alliage possède une microstructure à grains allongés comme conséquence de la déformation par laminage que l'alliage a subi. La maturation conduit à la formation de particules intermétalliques (zones GP) au sein de l'alliage. Ces particules constituent des obstacles qui freinent le mouvement des dislocations en améliorant ainsi la résistance mécanique de l'alliage.

Les observations micrographiques de l'alliage 2017 à l'état reçu révèlent une microstructure à grains allongés conformément à l'état T3 (figure III.1). D'autre part, la microstructure ne révèle pas de particules intermétalliques (zones GP). Ceci est dû au fait que ces particules sont d'une taille très petite (de l'ordre de nm) et leur mise en évidence nécessite des grossissements plus grands (observations au MET)



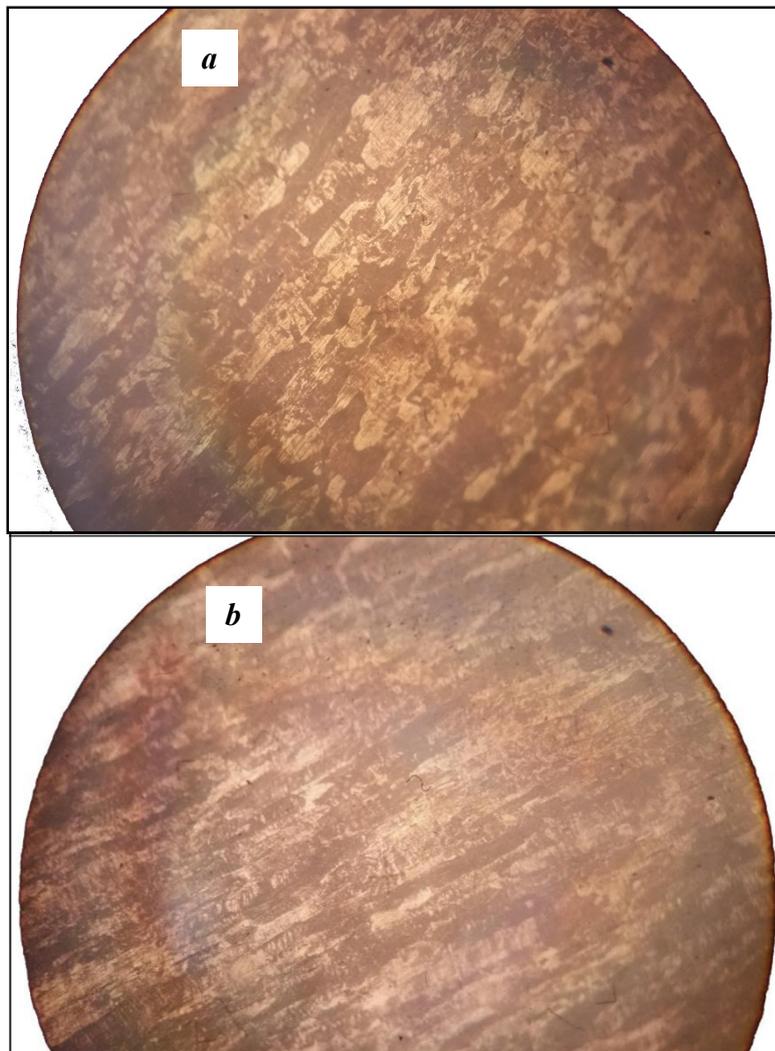
**Figure III.1 : Microstructure de l'alliage 2017 à l'état brut.**

### ***III.2 .Effet de la déformation plastique par laminage sur la microstructure de l'alliage 2017 :***

Afin de supprimer l'effet du traitement T3 que l'alliage a déjà subi, ce dernier a été porté à la température 505 °C pendant 2h suivi d'une trempe énergétique à l'eau (25 °C). L'alliage ainsi obtenu a été déformé par laminage à froid à deux taux de déformation 50 % et 75 % et ceci dans le but de mettre en exergue l'effet de la déformation plastique sur l'alliage. La microstructure correspondant à chaque taux de déformation est montrée sur la figure III.2.

Il est montré dans les deux cas que la microstructure est granulaire avec des grains allongés dans la direction de laminage. Cet allongement est beaucoup plus prononcé dans le cas correspondant à 75 % de taux de déformation. Par contre, la taille des grains augmente avec l'augmentation du taux de déformation. En fait, la taille moyenne des grains estimée est de 7.68  $\mu\text{m}$  et 9.385  $\mu\text{m}$  pour, respectivement, 50% et 75% de taux de déformation. Cette augmentation est dû au fait que les grains sont plus allongés pour les taux de déformation élevés.

Certainement, la déformation plastique, notamment quand elle est large tel est notre cas, a d'autres effets sur la microstructure apart l'allongement des grains comme par exemple, l'introduction de dislocations et la fragmentation des particules intermétalliques. Cependant, leur mise en évidence nécessite des moyens d'observations plus performants. Néanmoins, d'après la littérature la majorité des effets s'intensifient avec le taux de déformation.



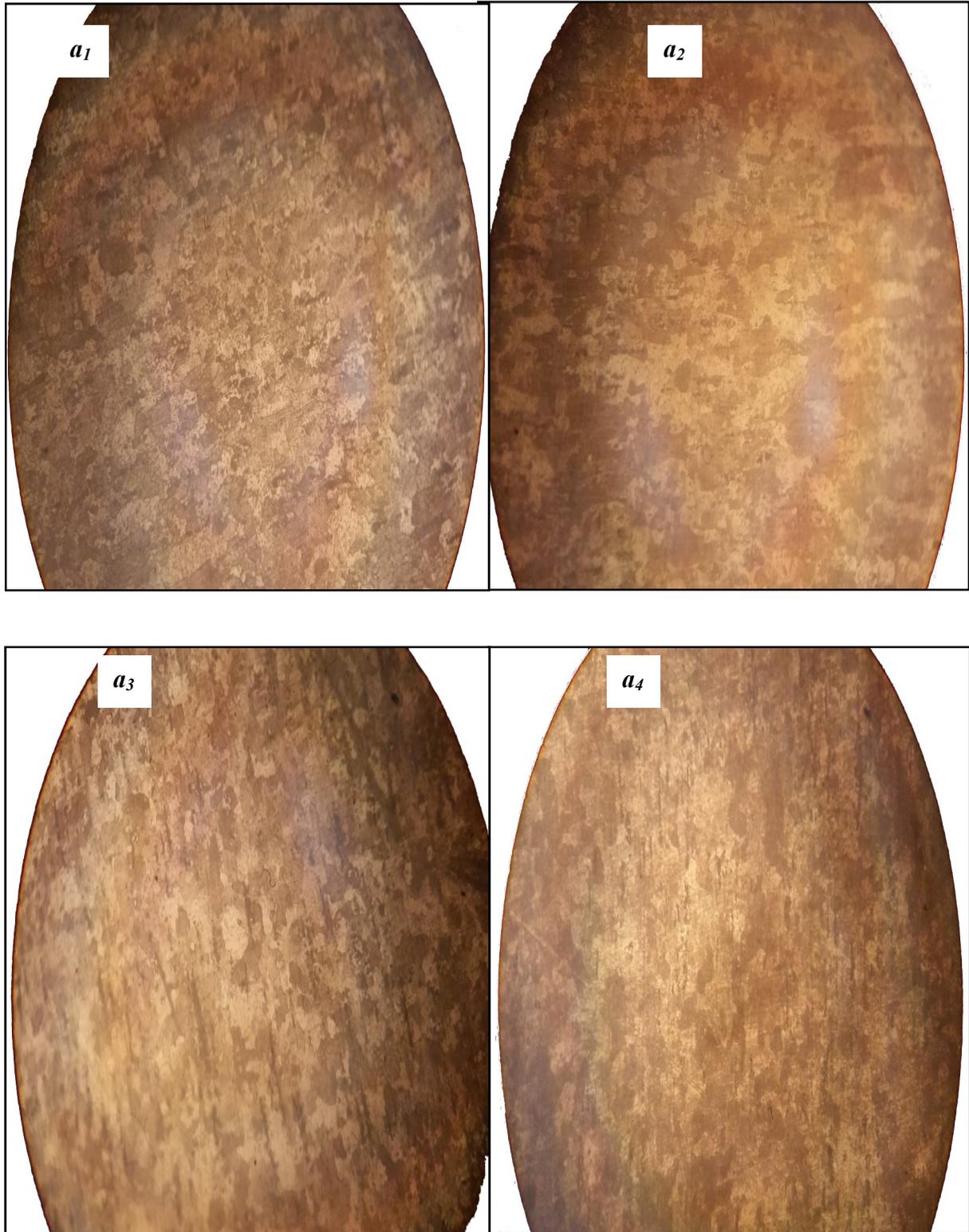
**Figure III.2: Microstructure de l'alliage 2017 : (a) déformé à 50% et (b) déformé à 75%.**

***III.3 .Effet des traitements thermiques après déformation sur la microstructure de l'alliage 2017 :***

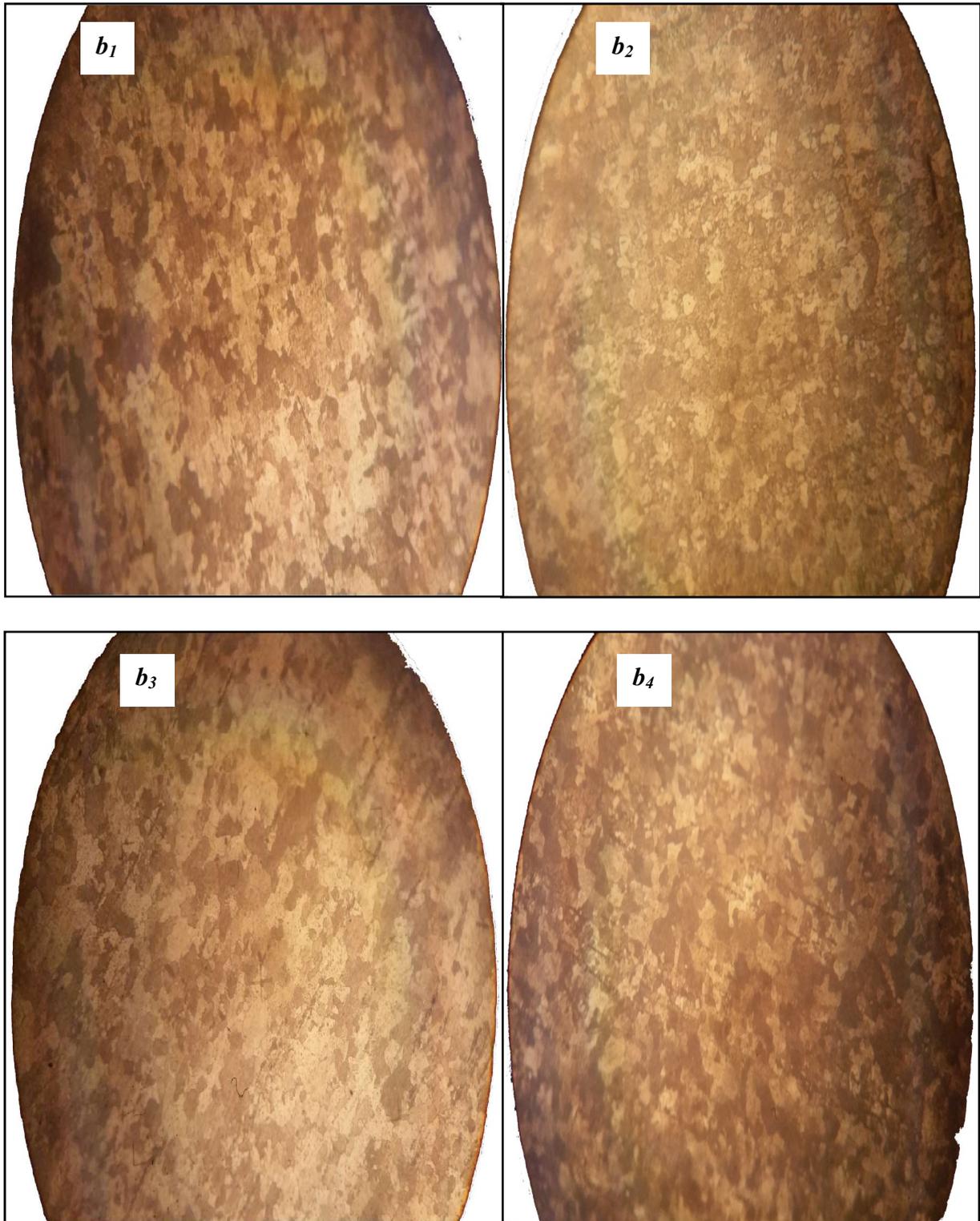
Afin de voir l'effet de des traitements thermomécaniques sur la microstructure de l'alliage 2017, ce dernier été traité à trois températures différentes (400°C, 450°C, 500°C) pendant deux temps différents et pour deux taux de réduction par laminage à froid : 50 % et 75%.

Les observations micrographiques au microscope optique de la microstructure de l'alliage dans chaque état de traitement ont abouti aux résultats montrés sur les figures (III.3, III.4, III.5). Il est montré que la microstructure de l'alliage déformé a subi des changements considérables après traitement thermique. En fait, les grains ne sont plus allongés et de taille quasi-homogène notamment pour les températures de traitement élevées. Ce changement est connu sous le nom de recristallisation.

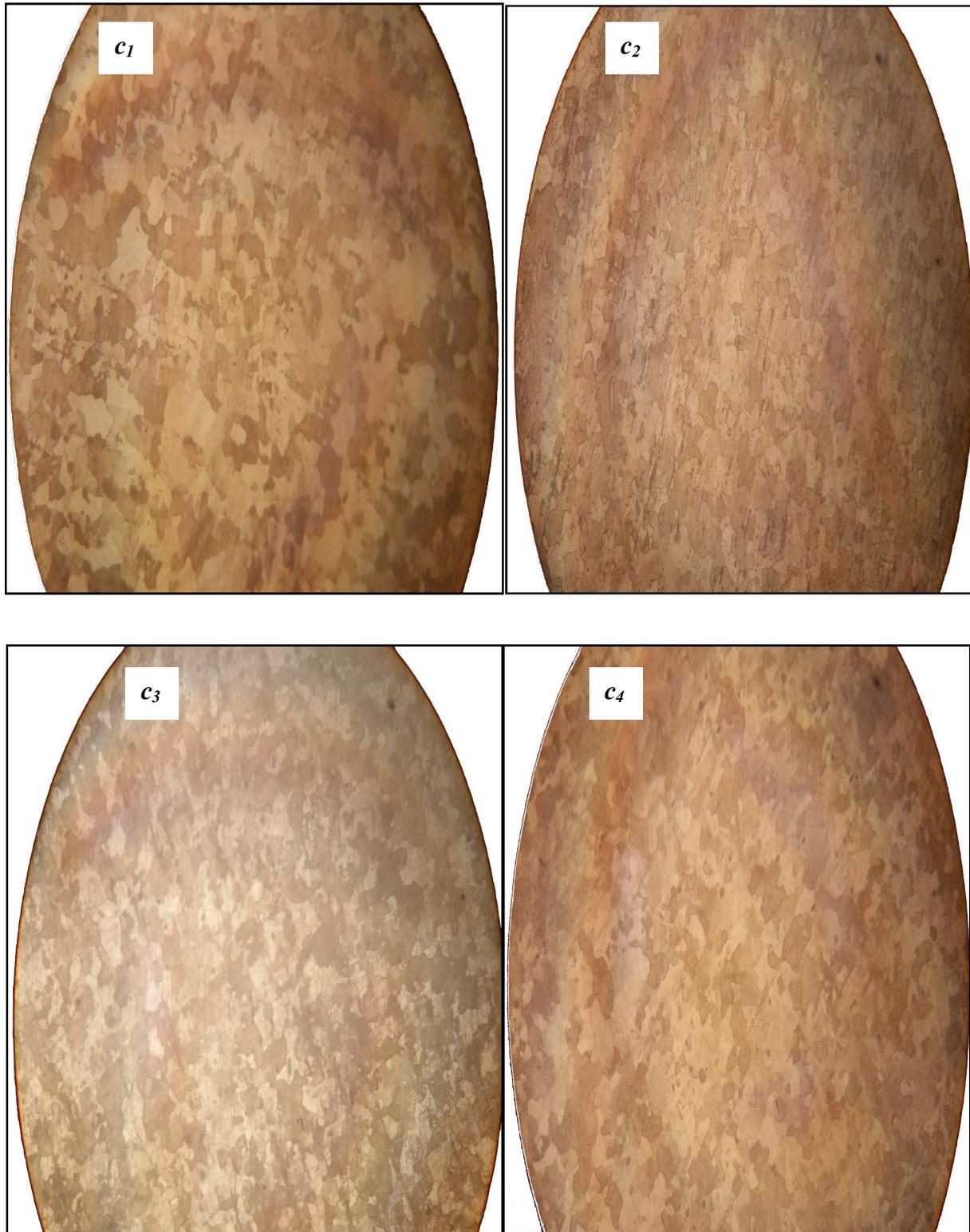
Afin de mieux voir l'effet des traitements thermiques sur la microstructure de l'alliage 2017 déformé, la taille moyenne des grains a été estimée dans chaque cas et l'ensemble de résultat sont donnés sous forme de graphes puis l'effet de chaque paramètres a été discuté appart.



**Figure III.3 : Microstructure de l'alliage 2017 déformé et traité à 400°C : ( $a_1$ ) déformé à 50% et traité 10mn, ( $a_2$ ) déformé à 50% et traité 2h, ( $a_3$ ) déformé à 75% et traité 10mn et ( $a_4$ ) déformé à 75% et traité 2h.**



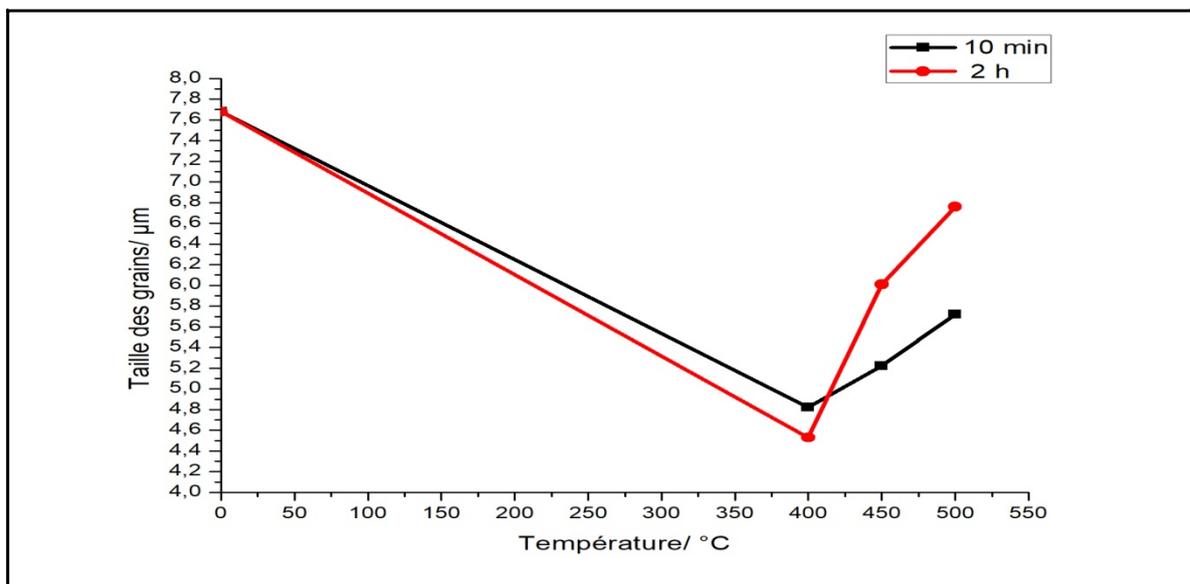
**Figure III.4 : Microstructure de l'alliage 2017 déformé et traité à 450°C : ( $b_1$ ) déformé à 50% et traité 10mn, ( $b_2$ ) déformé à 50% et traité 2h, ( $b_3$ ) déformé à 75% et traité 10mn et ( $b_4$ ) déformé à 75% et traité 2h.**



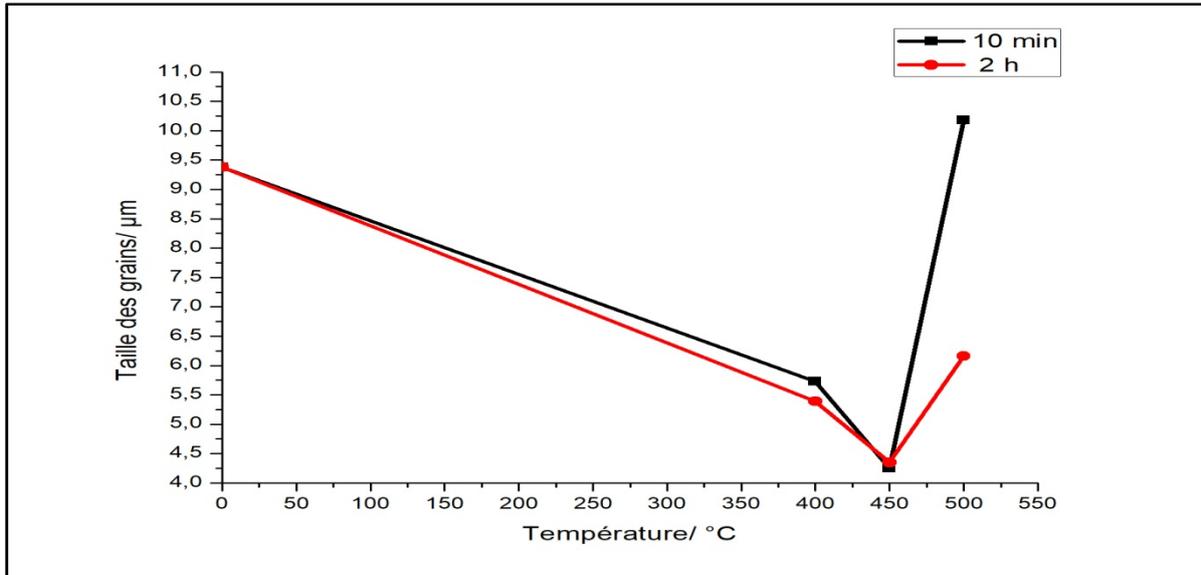
**Figure III.5 : Microstructure de l'alliage 2017 déformé et traité à 500°C : (c<sub>1</sub>) déformé à 50% et traité 10 mn, (c<sub>2</sub>) déformé à 50% et traité 2h, (c<sub>3</sub>) déformé à 75% et traité 10 mn et (c<sub>4</sub>) déformé à 75% et traité 2h.**

**III.3.1.Effet de la température du traitement :**

Les figures (III.6 et III.7) donnent la variation de la taille moyenne des grains de l'alliage déformé en fonction de la température. Il est montré clairement que plus la température du traitement est élevée plus la taille des grains est grande et ceci quel que soit le taux de laminage et la durée du traitement. Cependant, un comportement aberrant est montré dans le cas d'une déformation de 75% pour un traitement à 400°C. Il est très probablement que ceci est dû à l'inexactitude dans la mesure de la taille moyenne des grains. En vérité, le processus de recristallisation est un processus qui est contrôlé par le mécanisme de diffusion des atomes dans la matrice. Et comme la diffusion est favorisé par la température, donc plus la température est élevée plus la diffusion est facile et plus le processus de recristallisation est accéléré. Par conséquent, pour les mêmes conditions plus la température est élevée plus la taille des grains est grande.



**Figure III.6 : Variation de la taille moyenne des grains en fonction de la température de l'alliage 2017 déformé à 50%.**



**Figure III.7 : Variation de la taille moyenne des grains en fonction de la température de l'alliage 2017 déformé à 75%.**

### *III.3.2. Effet de la durée du traitement :*

Les figures (III.8, III.9, III.10) montrent la variation de la taille moyenne des grains en fonction de la durée du maintien aux différentes températures et pour les deux taux de déformation considérés. Il est montré que la taille des grains varie peu avec la durée du maintien et ceci à toutes les conditions considérées. En fait, la taille de grain obtenue après 10 mn de traitement est quasiment la même que celle achevée après deux heures de traitement thermique. Ceci suggère que la recristallisation a été pratiquement achevée après juste 10 mn de traitement. Ceci est dû au fait que les températures de traitements considérées sont assez élevées pour que la diffusion soit assez importante à un point où la recristallisation s'achève après une telle courte durée du traitement.

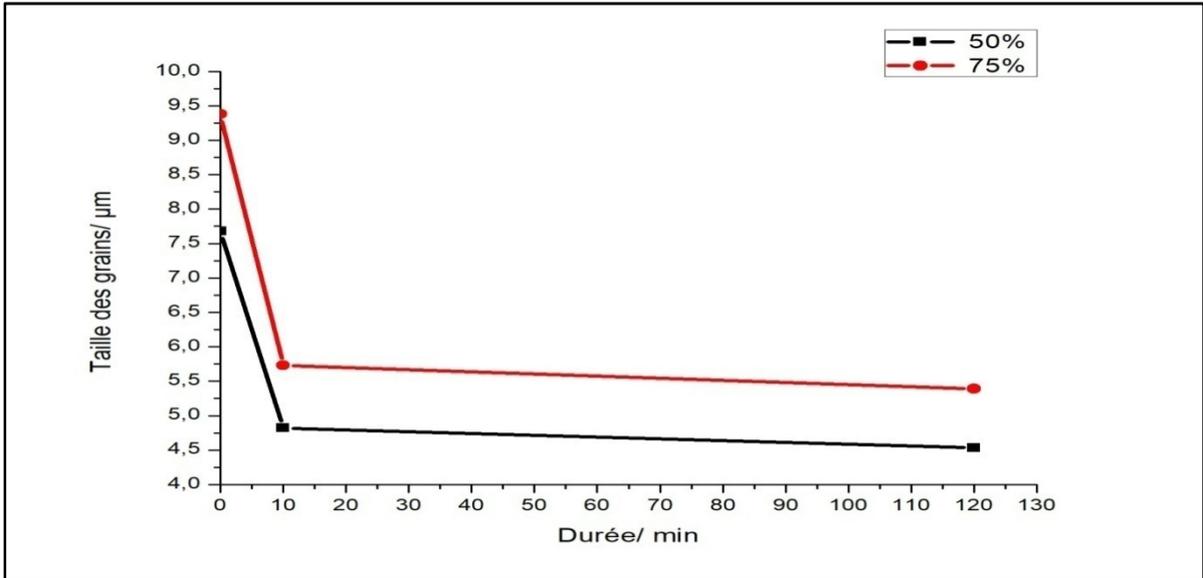


Figure III.8 : Variation de la taille moyenne des grains en fonction de la durée du traitement à la température 400°C.

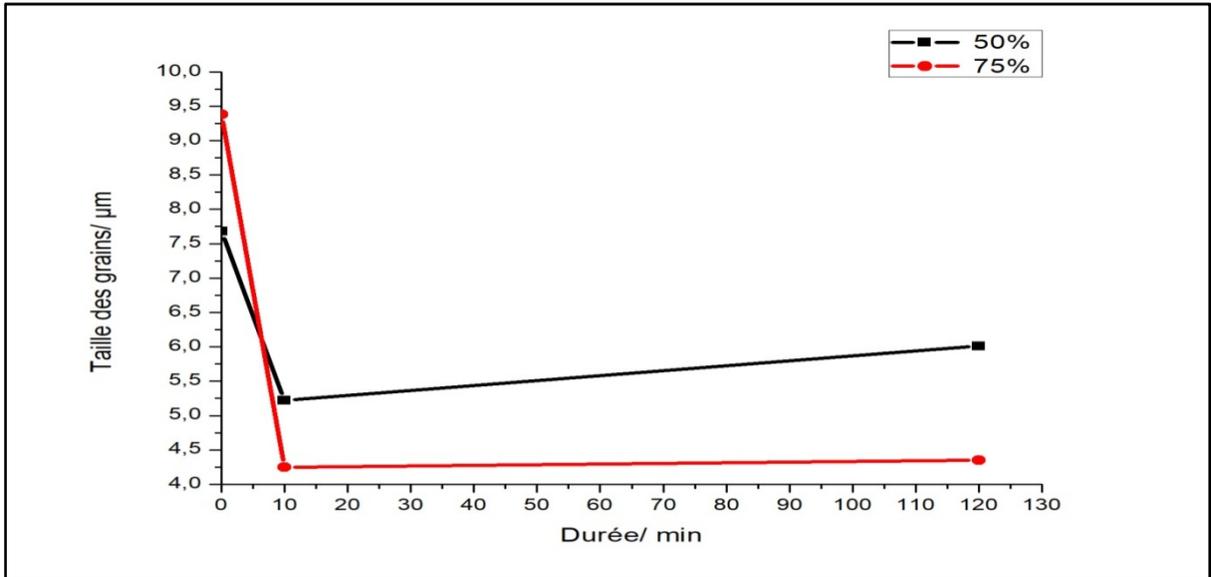
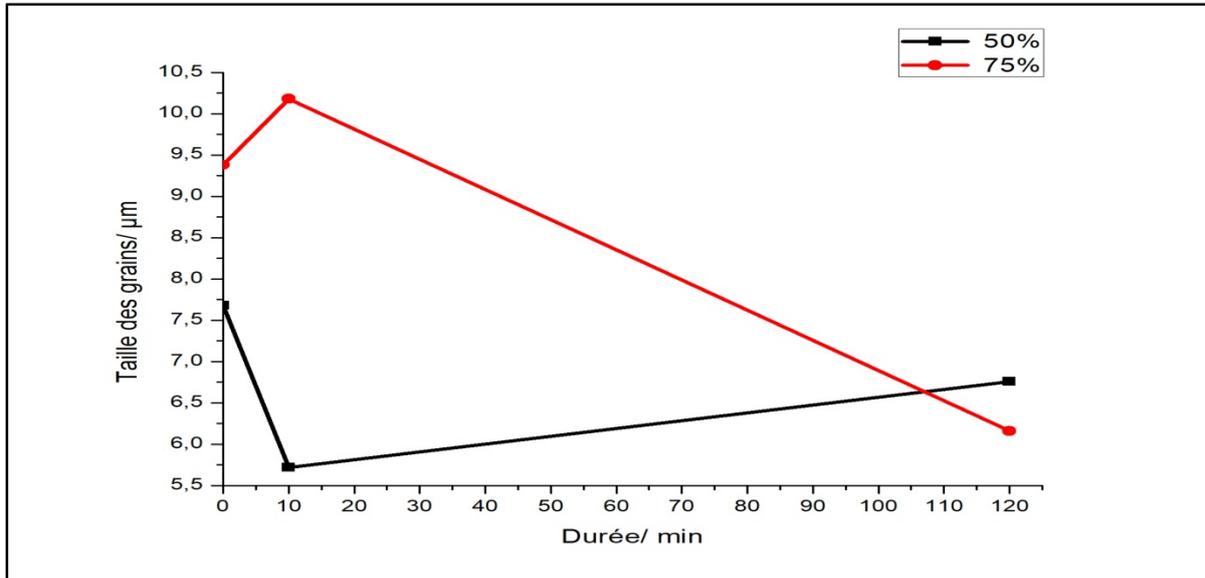


Figure III.9: Variation de la taille moyenne des grains en fonction de la durée du traitement à la température 450°C



**Figure III.10: Variation de la taille moyenne des grains en fonction de la durée du traitement pour la température 500°C.**

### **III.3.3. Effet du taux de déformation :**

Lorsque l'alliage a subi une déformation plastique, il est dit écroui. Sa structure a été altérée, ses propriétés physiques et mécaniques ont été modifiées; il n'est plus dans un état d'équilibre. Au cours du recuit des germes apparaissent; ce sont de nouveaux cristaux d'orientation différente de la matrice ou ils sont nés [31].

Les résultats de cette étude mettent en évidence, d'une part l'influence notable du taux de déformation sur la taille des grains. La figure (III.11) montre l'état structural de l'alliage 2017 à 400°C, cette figure montre que en augmentant le taux de déformation cela conduit à une augmentation de la taille des grains et ça est dû à l'augmentation de la densité de dislocations qui ont tendance à s'enchevêtrer et à se bloquer [32].

Les figures (III.12, III.13) montrent une décroissance de la taille des grains, les grains se subdivisent, changent de forme et s'allongent selon la direction de sollicitation. Cette subdivision donne lieu à une nouvelle configuration cellulaire constituée de parois. Quand le taux de déformation augmente, les parois des cellules s'affinent, et cette transformation est accompagnée d'une diminution de la taille des grains [33].

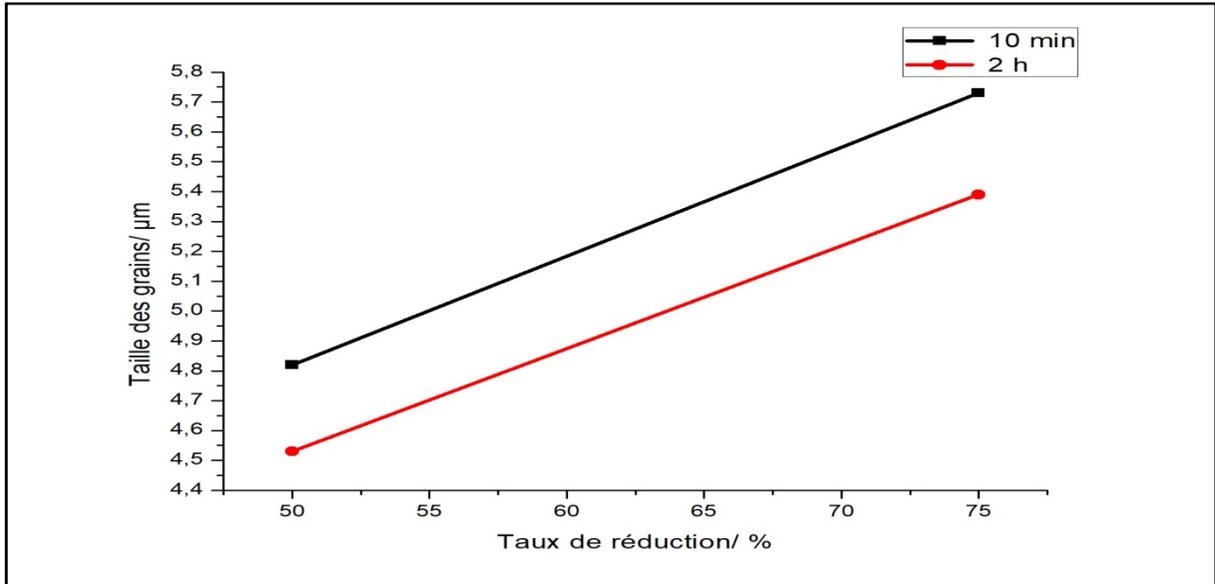


Figure III.11: Variation de la taille moyenne des grains en fonction du taux de réduction à  $400^\circ\text{C}$ .

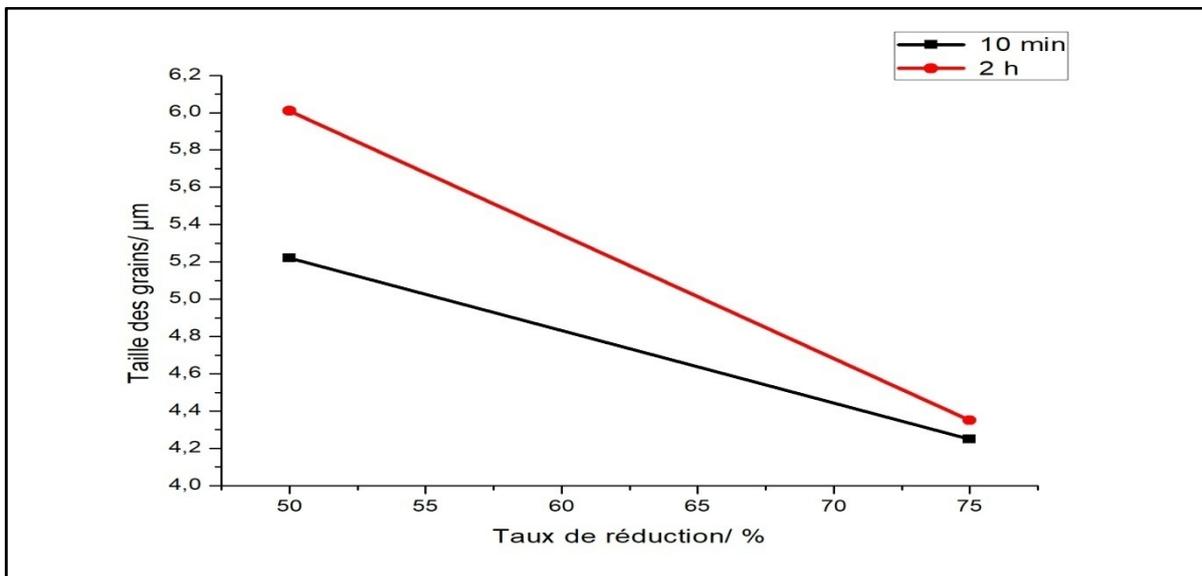


Figure III.12: Variation de la taille moyenne des grains en fonction de taux de réduction à  $450^\circ\text{C}$ .

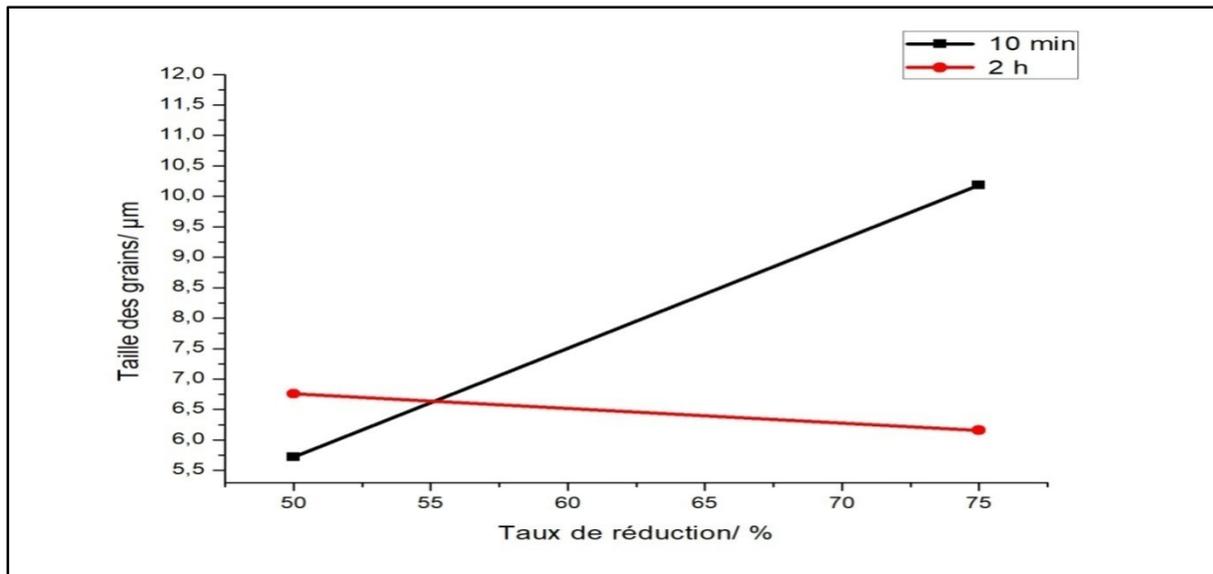


Figure III.13: Variation de la taille moyenne des grains en fonction de taux de réduction à 500°C.

#### III.4. Effet des traitements thermomécaniques sur la résistance mécanique de l'alliage 2017 :

L'essai de traction constitue un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des matériaux. Il permet d'avoir de nombreuses grandeurs physiques caractérisant le matériau, comme la contrainte à rupture, la contrainte maximale, la limite d'élasticité. De ce fait, des essais de traction ont été réalisés sur l'alliage 2017 et ceci dans chaque état de traitement. L'ensemble des résultats obtenus sont montrés sur les figures (III.14, III.15, III.16, III.17, III.18). Pratiquement toutes les courbes obtenues ont la même allure et composées de trois régions différentes ; une région linéaire, suivi d'une augmentation non linéaire puis d'une décroissance après avoir atteint un maximum [34].

La partie linéaire est la partie élastique du matériau, celle dans laquelle l'alliage reprend sa forme initiale une fois la contrainte est supprimée. La deuxième et la troisième partie constitue la partie plastique dans laquelle la déformation du matériau est permanente. La diminution de la contrainte nécessaire pour la progression de la déformation (troisième région) indique le commencement de la réduction de la section de l'éprouvette ce qui réduit la contrainte nécessaire pour la déformation. Cette réduction est suivie de l'apparition de microfissures au sein de l'éprouvette dont la propagation conduit à la rupture.

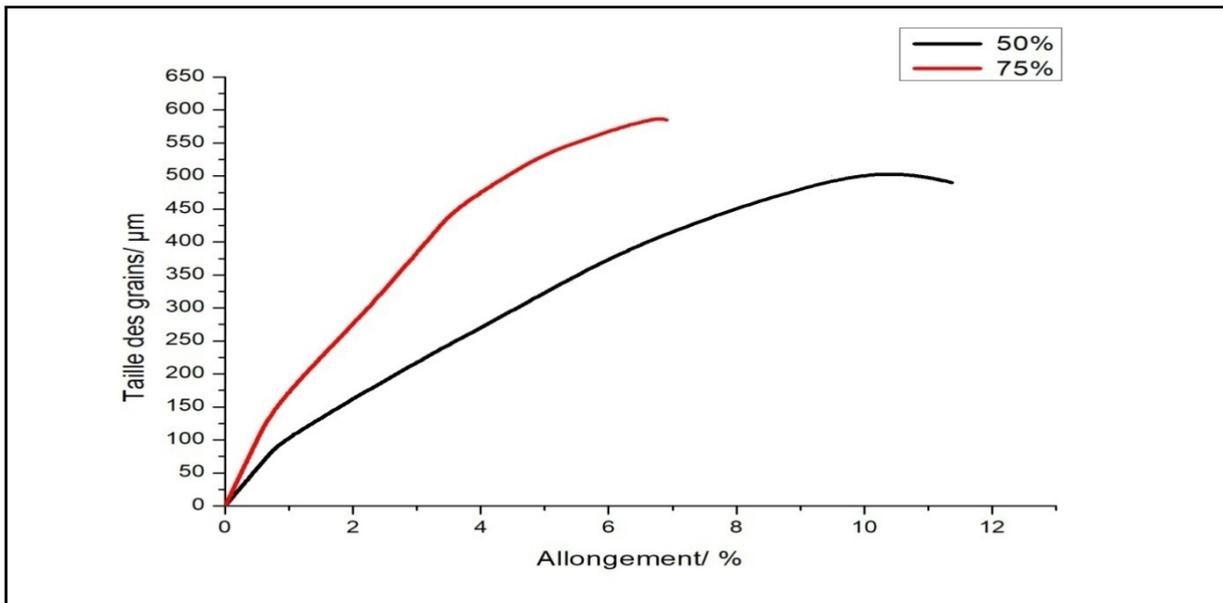


Figure III.14: Courbe de traction réalisée sur l'alliage non-traité

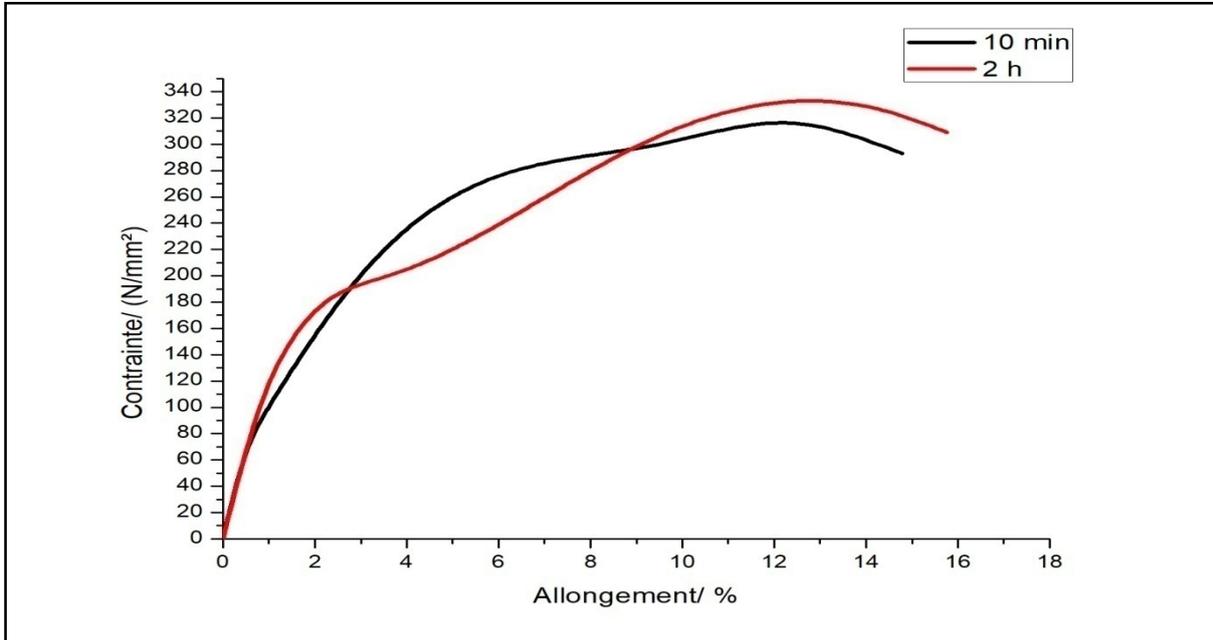


Figure III.15: Courbe de traction réalisée sur l'alliage déformé à 50% et traité à 400 °C.

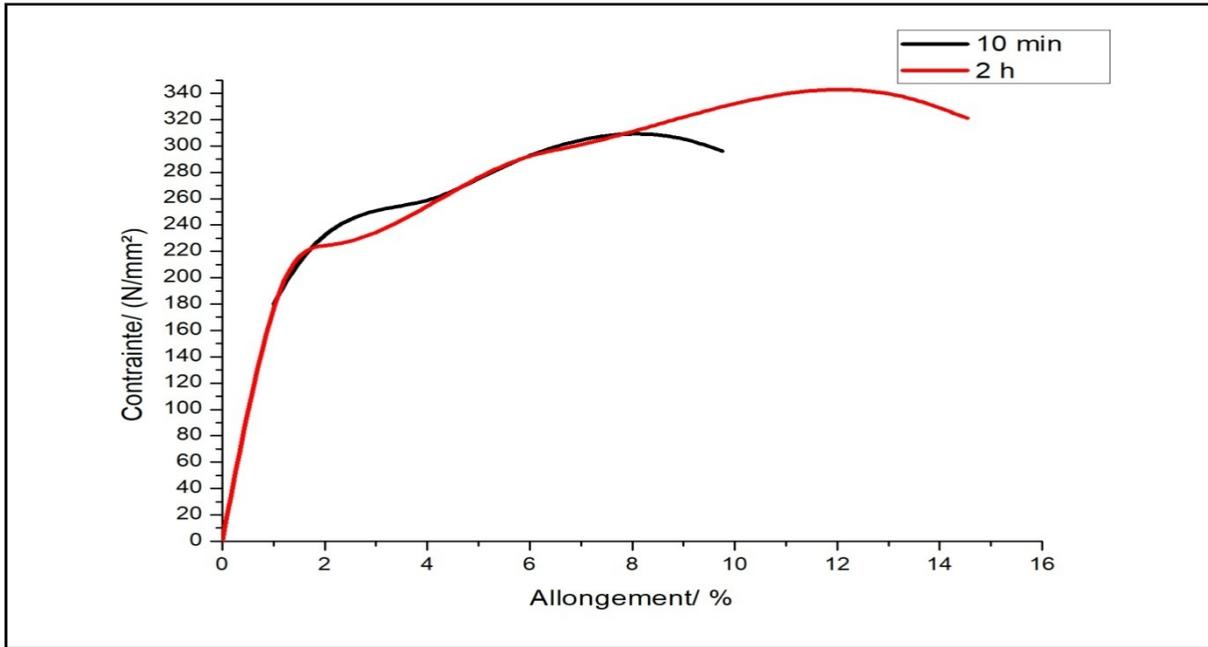


Figure III.16: Courbe de traction réalisée sur l'alliage déformé à 75% et traité à 400 °C.

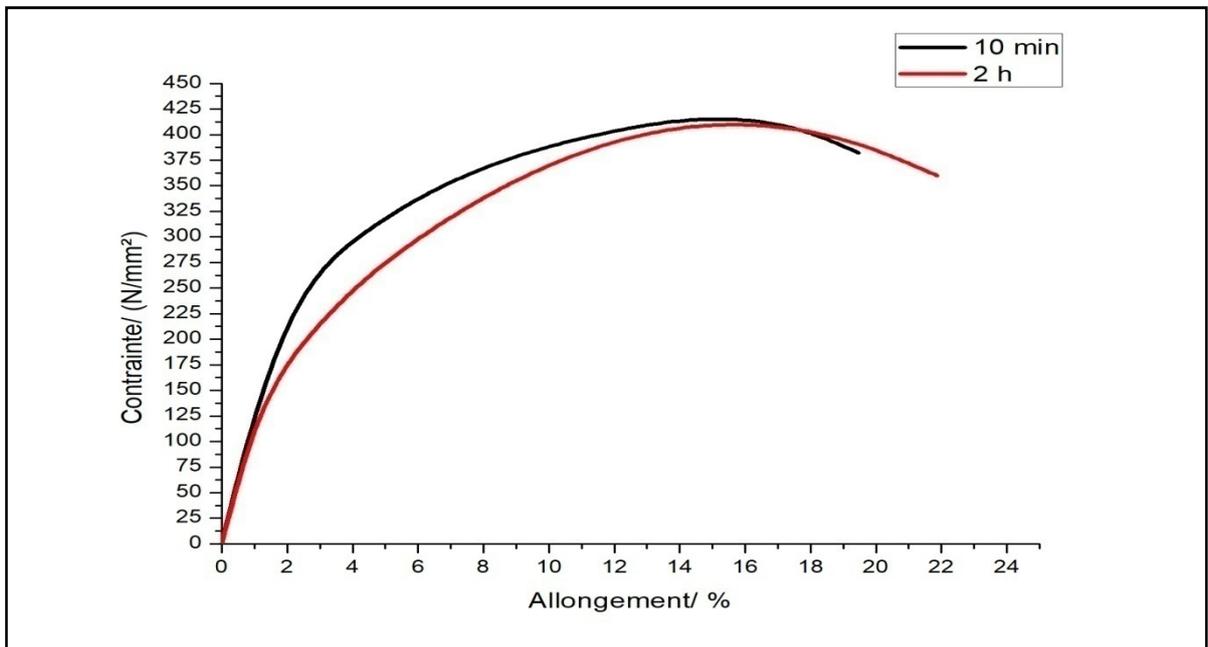


Figure III.17: Courbe de traction réalisée sur l'alliage déformé à 50% et traité à 500 °C.

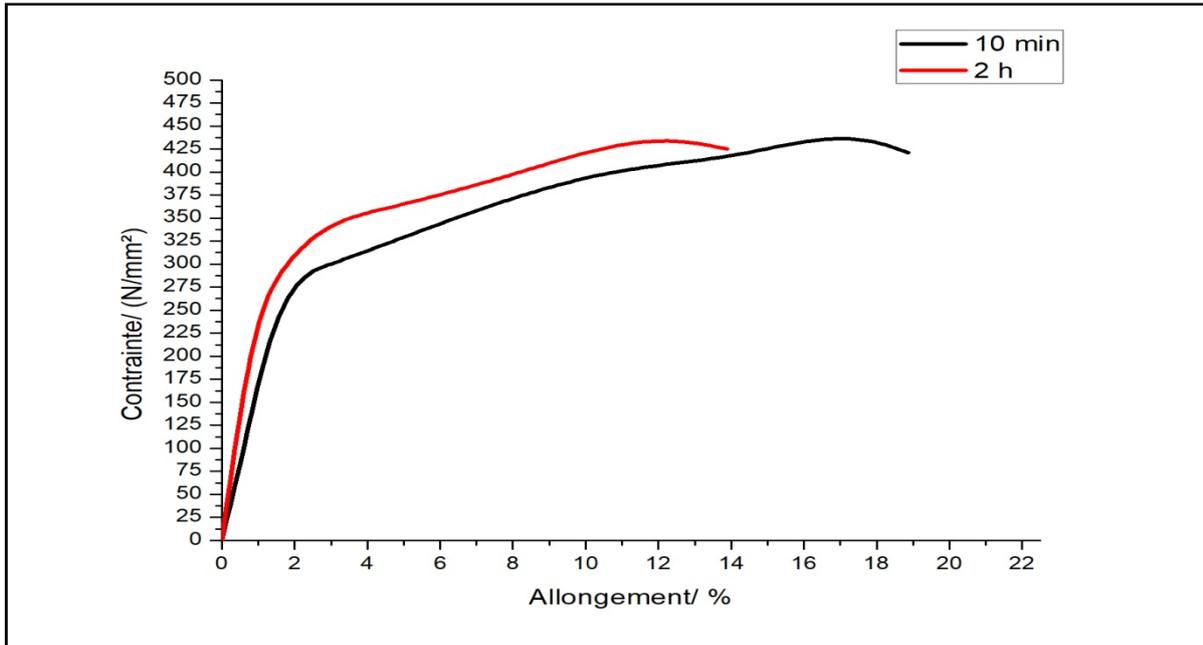
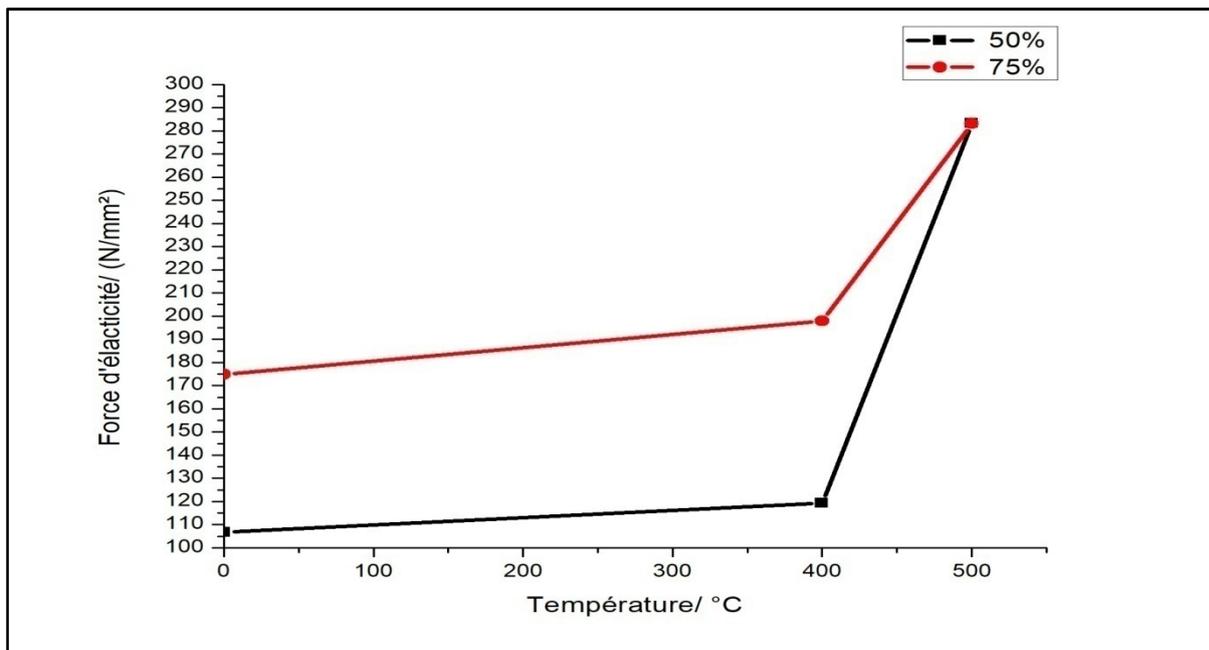


Figure III.18: Courbe de traction réalisée sur l'alliage déformé à 75% et traité à 500 °C.

#### III.4.1. Effet de la température du traitement :

Les figures (III.19 et III.20) montrent la variation de la limite d'élasticité en fonction de la température du traitement de l'alliage 2017 déformé. Il est montré clairement que la limite d'élasticité augmente avec l'augmentation de la température. En fait, la déformation plastique induit dans l'alliage un grand nombre de défauts (dislocation et joints de grains), ce qui réduit la ductilité du matériau et donc sa limite d'élasticité. D'autre part, le traitement thermique a pour effet d'éliminer tous les défauts introduits par la déformation et donc de ramener l'alliage à son état avant déformation, ce qui augmente à nouveau la ductilité de l'alliage. Comme il a été mentionné auparavant, la restauration (recristallisation) de l'état initiale de l'alliage est un processus contrôlé par la diffusion des atomes dans le matériau. De ce fait, pour le même temps de maintien, plus la température du traitement est élevée plus la restauration est rapide et plus prononcée et par conséquent, plus le matériau est ductile. Néanmoins, les mesures montrent un comportement différent, une ductilité qui diminue en fonction de la température du traitement. Ceci est probablement dû au durcissement par solution. En fait, ce dernier est proportionnel de la concentration d'éléments d'alliage (cuivre) dans la matrice et cette concentration augmente avec l'augmentation de la température. Par conséquent, plus la température du traitement est élevée plus le durcissement par solution est important et donc plus la limite d'élasticité est élevée [35].

D'un autre côté, la résistance à la traction et la résistance à la rupture montrent un autre comportement, une décroissance suivie d'une augmentation (figures III.21-III.24). Il est montré que la résistance à la traction est maximale à l'état déformé sans traitement. Ceci est certainement dû aux défauts introduits par la déformation. En fait, l'allongement de l'éprouvette dans la partie plastique lors de l'essai de traction se traduit à l'échelle microscopique par un déplacement de dislocations. Cependant, ce déplacement est contrarié par l'ensemble de défauts déjà introduits par le laminage, ce qui se traduit à l'échelle macroscopique par une augmentation de la résistance à la traction et la résistance à la rupture. La décroissance de ces deux grandeurs après traitement est due à l'annulation totale ou partielle des défauts induits par le laminage. D'autre part, leurs augmentation en fonction de la température du traitement est probablement dû aussi au durcissement par solution [35].



**Figure III.19: Variation de la limite d'élasticité en fonction de la température pour 10 mn de traitement.**

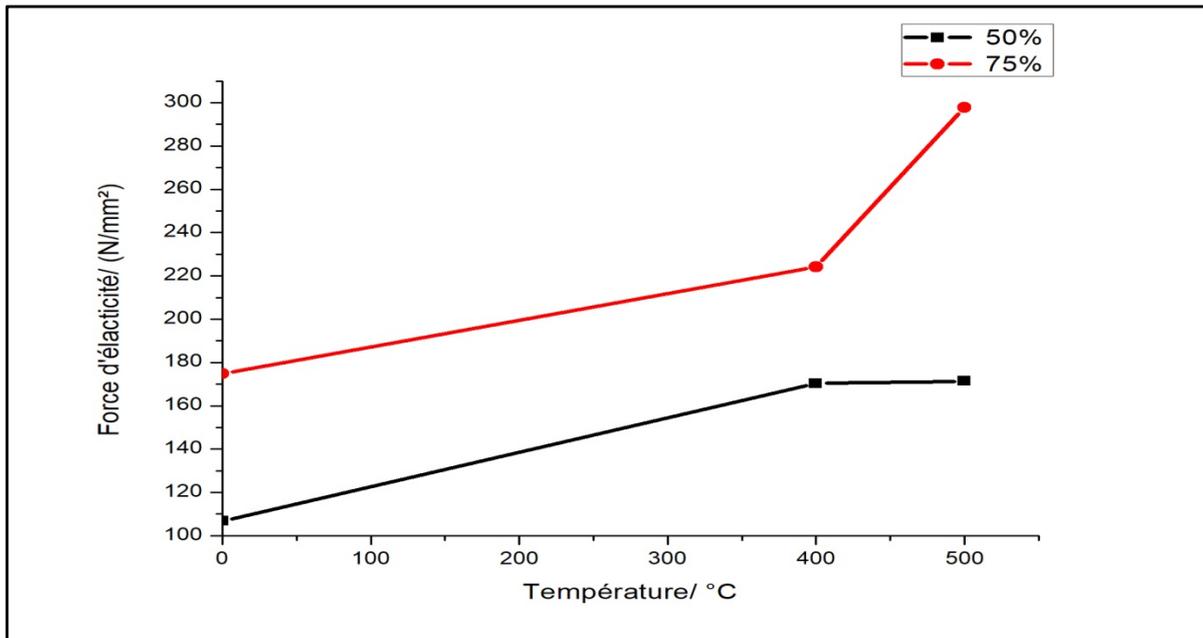


Figure III.20 : Variation de la limite d'élasticité en fonction de la température pour 2h de traitement.

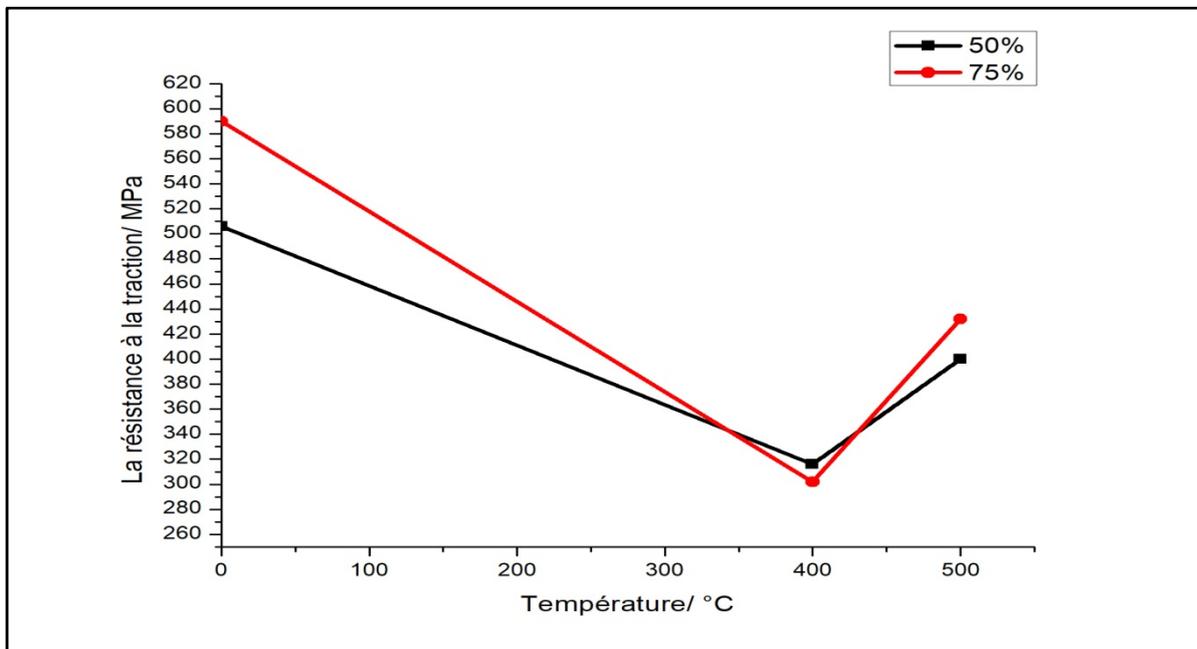


Figure III.21: Variation de la résistance à la traction en fonction de la température pour 10 mn de traitement.

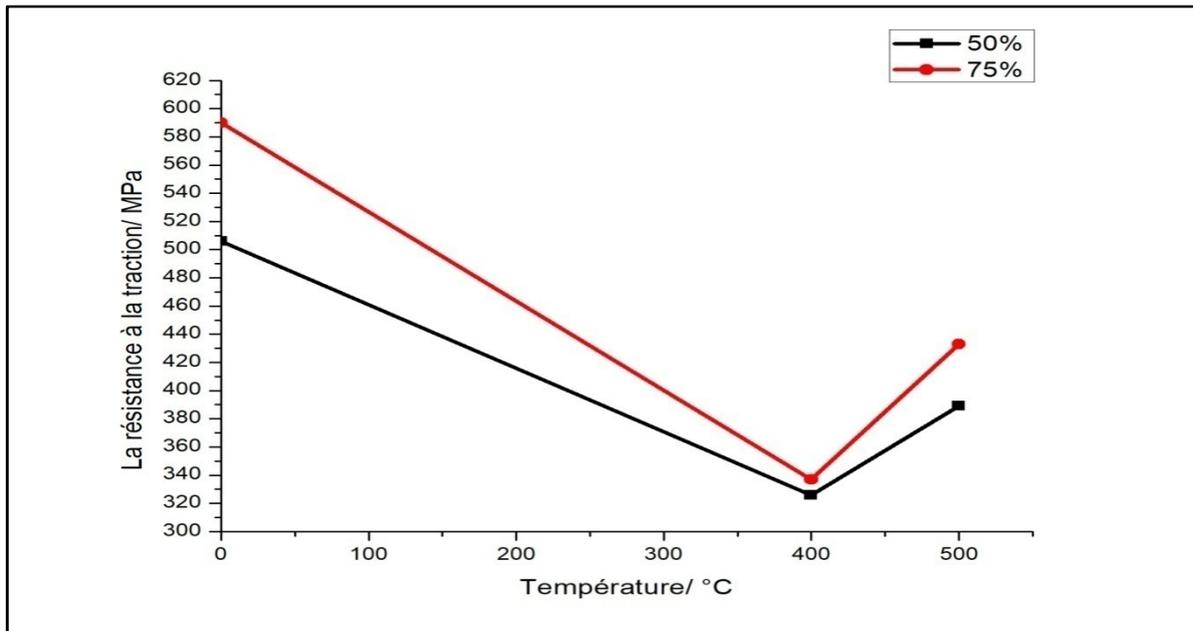


Figure III.22: Variation de la résistance à la traction en fonction de la température pour 2h de traitement.

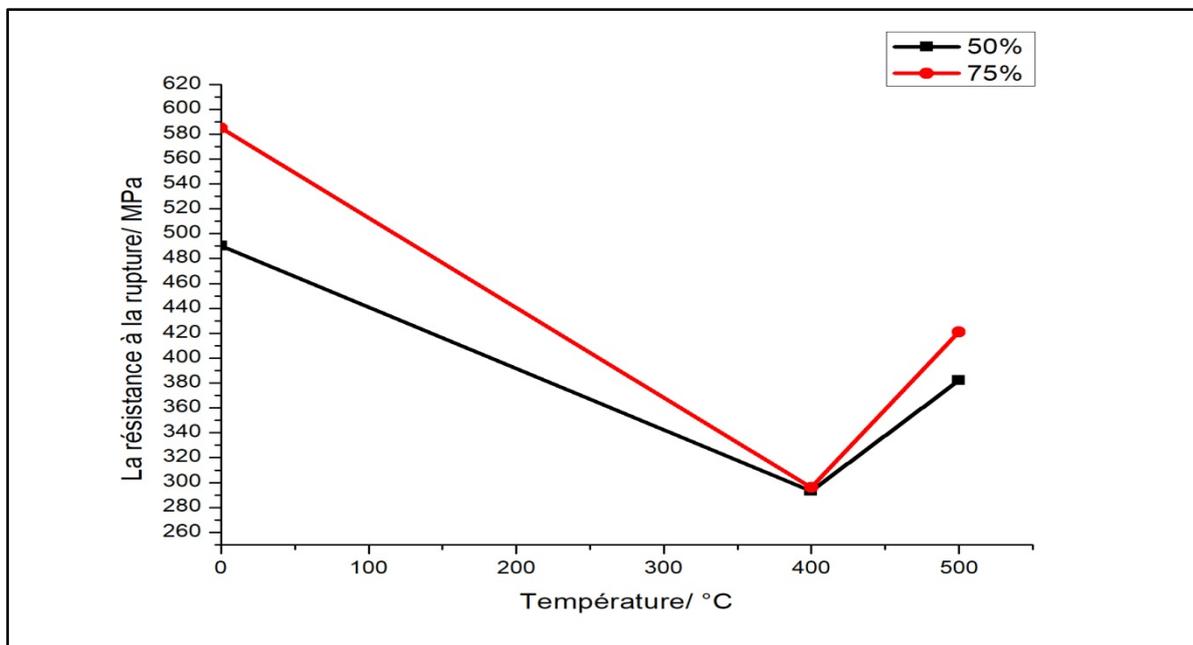


Figure III.23: Variation de la résistance à la rupture en fonction de la température pour 10 mn de traitement.

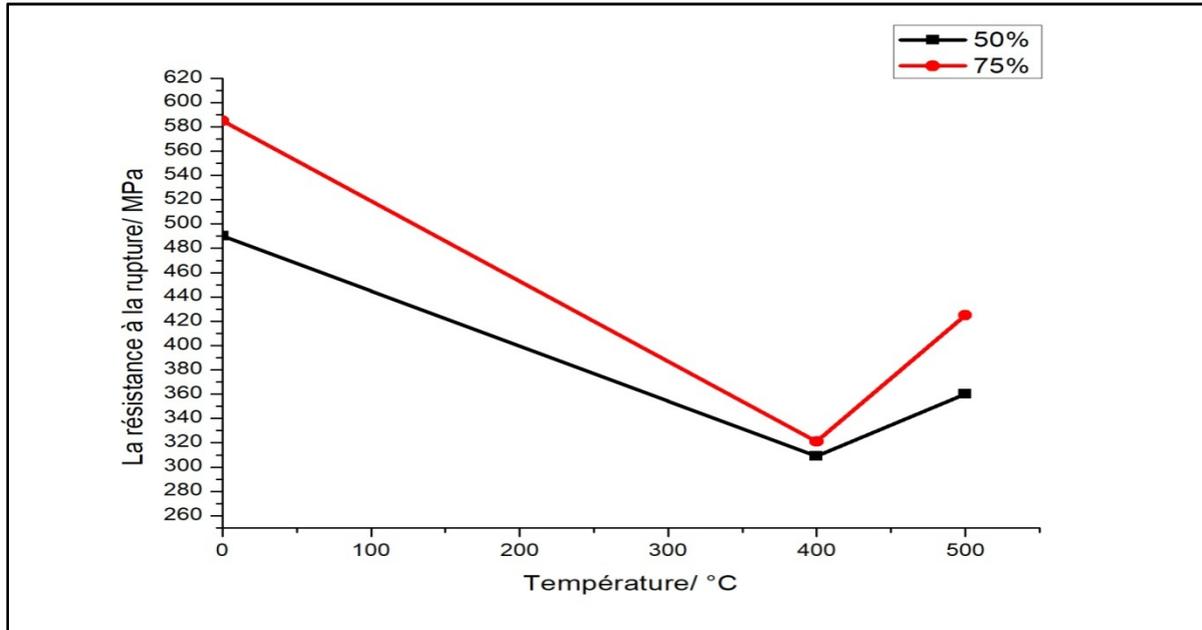


Figure III.24 : Variation de la résistance à la rupture en fonction de la température pour 2h de traitement.

#### III.4.2. Effet de la durée du traitement :

Généralement, la limite d'élasticité, la résistance à la traction et la résistance à la rupture décroissent en fonction de la durée du traitement de recristallisation. Ceci est dû au fait que le traitement thermique a pour effet d'annuler les défauts introduit par la déformation plastique appliquée. Cependant, une fois la recristallisation est achevée, ces trois grandeurs tendent à se stabiliser. Les figures (III.27-III.29) montrent clairement que ce comportement a été respecté par la résistance à la traction et la résistance à la rupture. La stabilisation de ces grandeurs juste après 10 mn de traitement suggère que la recristallisation a été déjà achevée après une telle courte durée du traitement. Cette interprétation est confirmée par les observations micrographiques (figure III.3-III.5). D'autre part, la force d'élasticité montre un comportement inhabituel. Ceci est très probablement dû à une mauvaise préparation des éprouvettes utilisées pour les essais de traction [36].

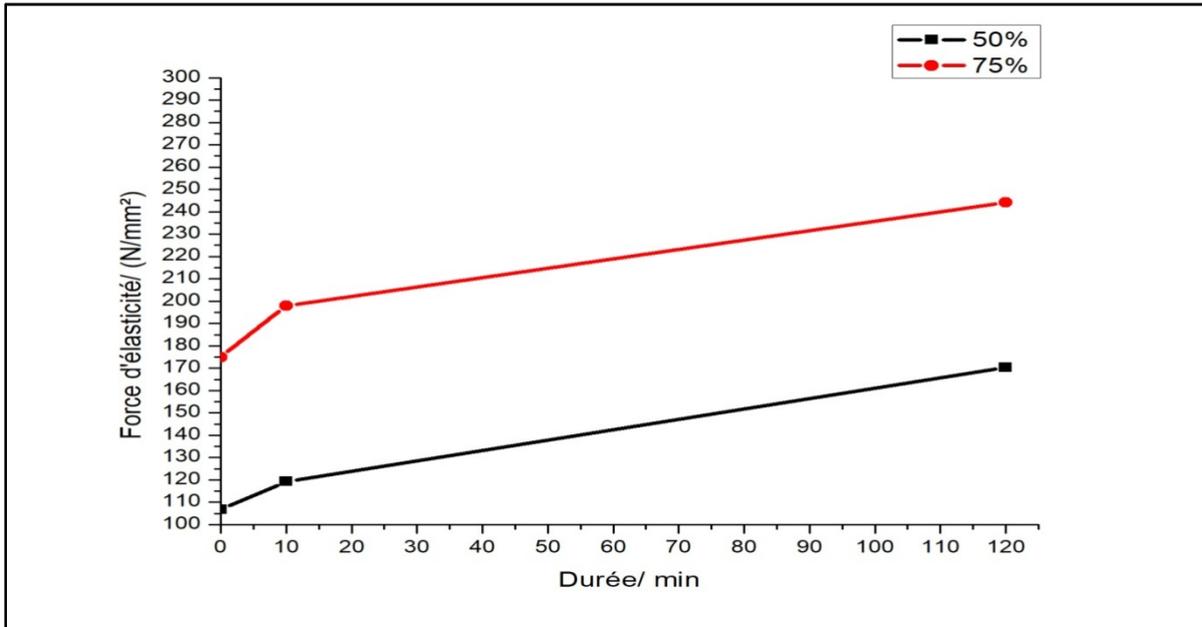


Figure III.25: Variation de la limite d'élasticité en fonction de la durée du traitement à 400 °C.

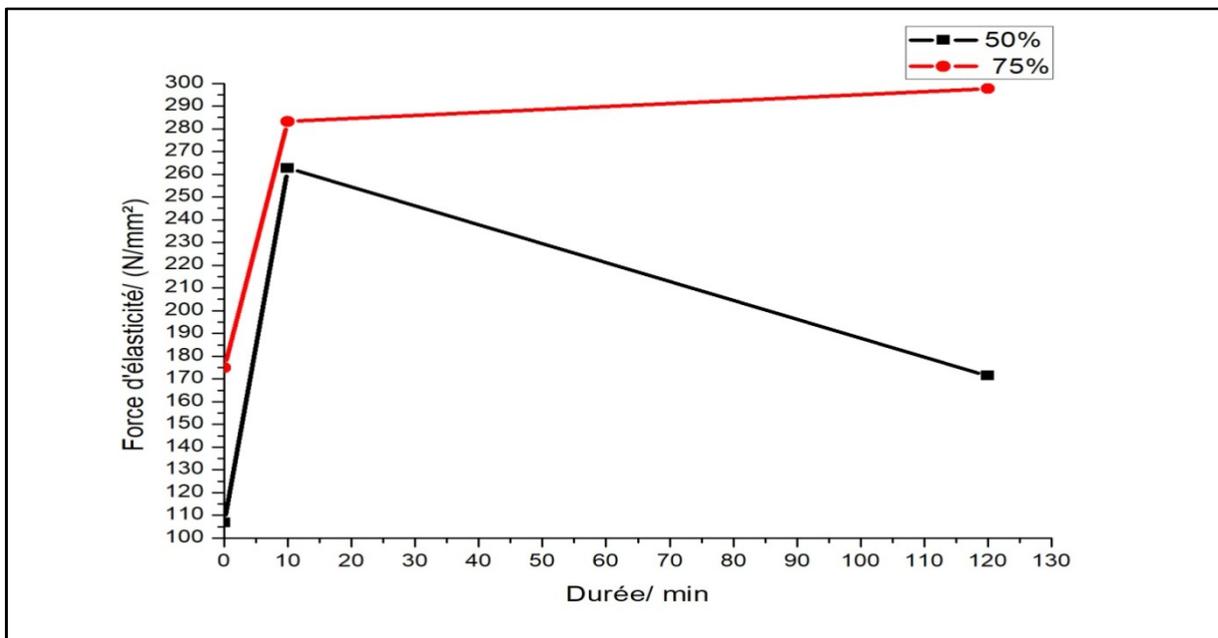


Figure III.26: Variation de la limite d'élasticité en fonction de la durée du traitement à 500°C.

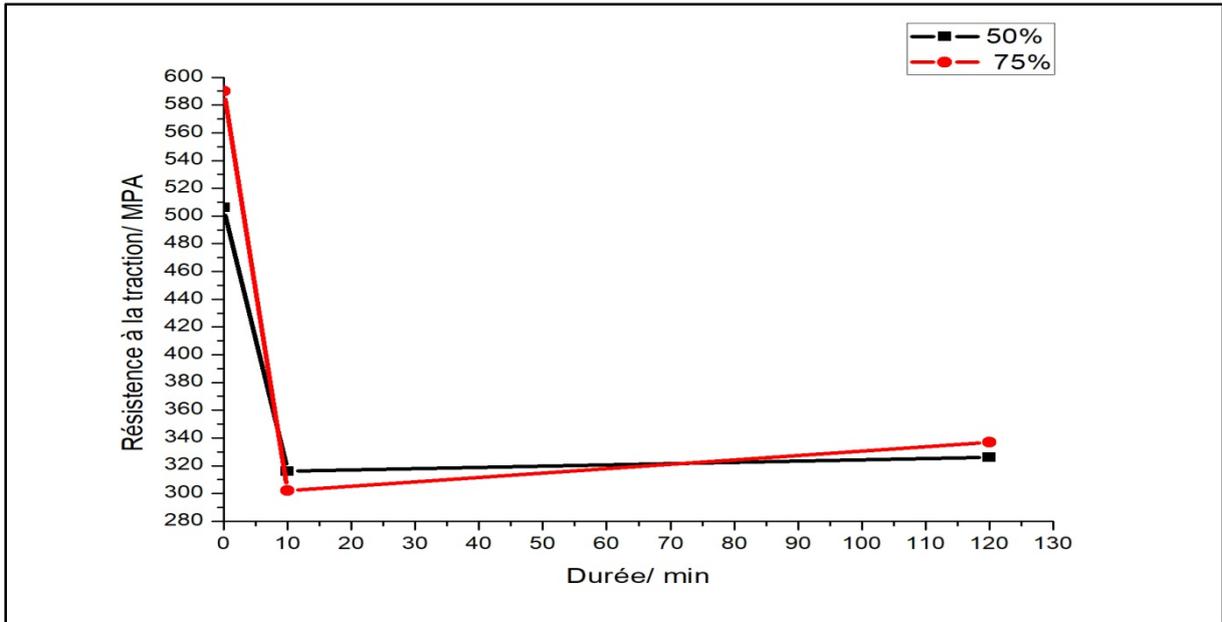


Figure III.27: Variation de la résistance à la traction en fonction de la durée du traitement à 400 °C

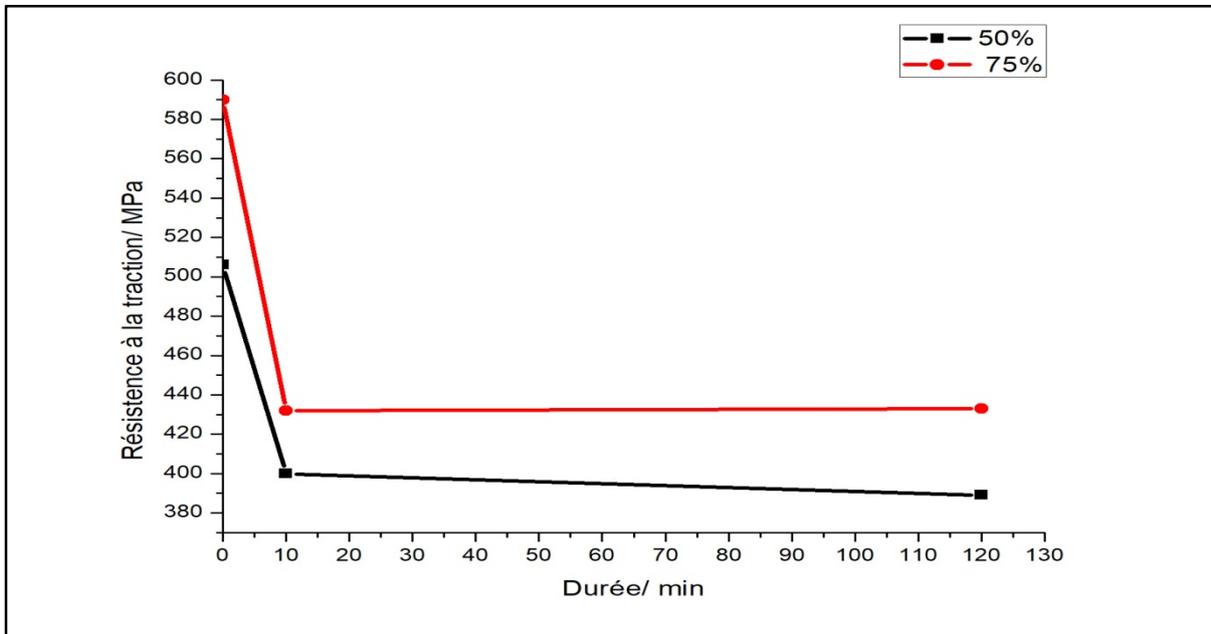


Figure III.28: Variation de la résistance à la traction en fonction de la durée du traitement à 500 °C

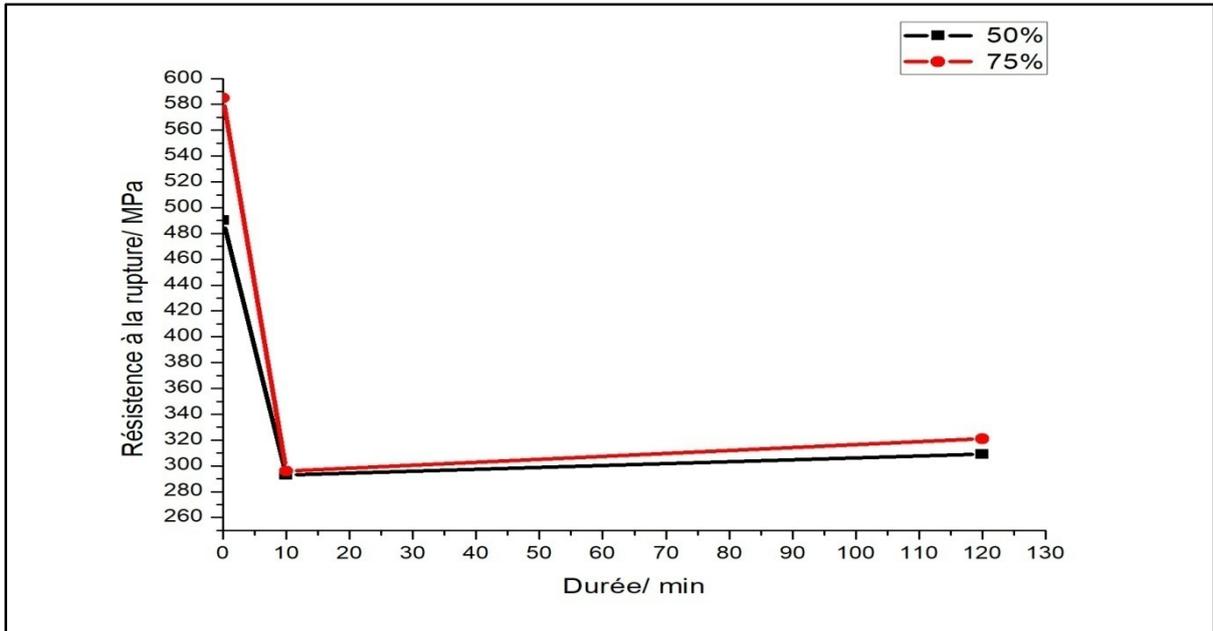


Figure III.29: Variation de la résistance à la rupture en fonction de la durée du traitement à 400 °C

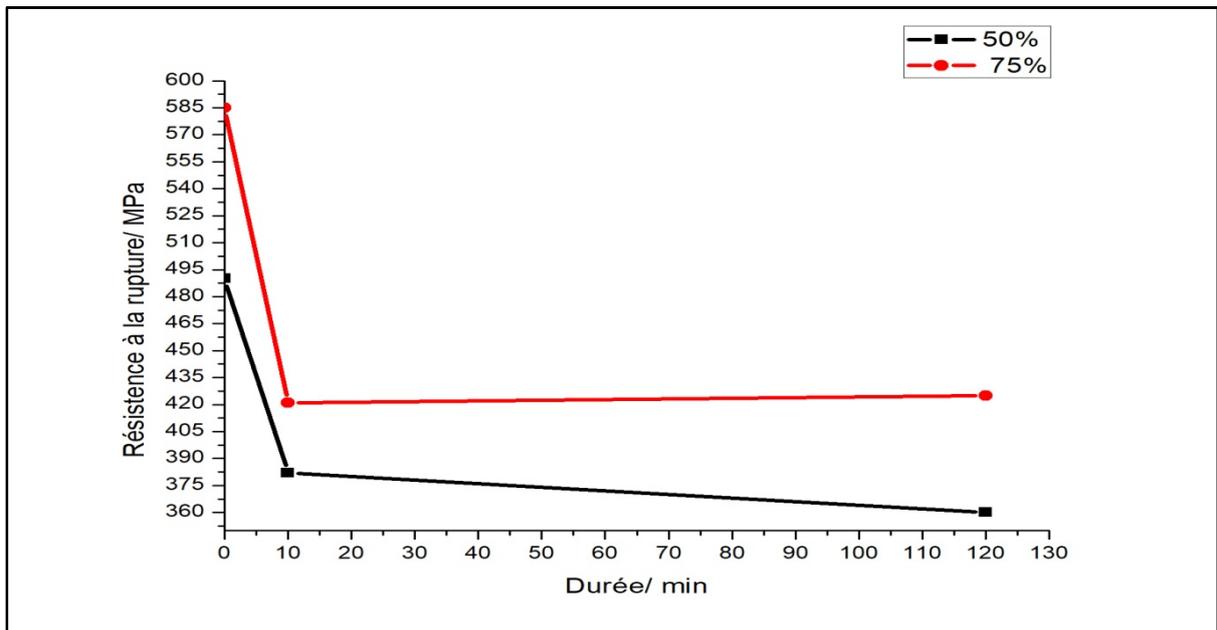


Figure III.30: Variation de la résistance à la rupture en fonction de la durée du traitement à 500 °C

III.4.3. Effet du taux de déformation :

Comme il a été pré-mentionné, la déformation plastique génère un grand nombre de défauts dans le matériau. Le nombre de défauts générés augmente avec l'augmentation du taux de déformation. En fait, ces défauts (dislocations et sous joints de grains) constituent de courts circuits de diffusion lors d'un éventuel traitement thermique. Par conséquent, plus le taux de déformation est élevé plus la diffusion des atomes lors du traitement thermique est facile et donc plus la recristallisation est accélérée. De ce fait, la recristallisation est plus rapide dans les échantillons les plus déformés. Généralement, la recristallisation réduit la limite d'élasticité, la résistance à la traction et la résistance à la rupture puisque elle annule des défauts introduits par la déformation. Cependant, les résultats sur les figures (III.33-III.36) montrent un comportement tout à fait absurde. L'explication de cette singularité nécessite plus d'investigations mais très probablement ceci est dû à une mauvaise préparation des éprouvettes des essais de traction.

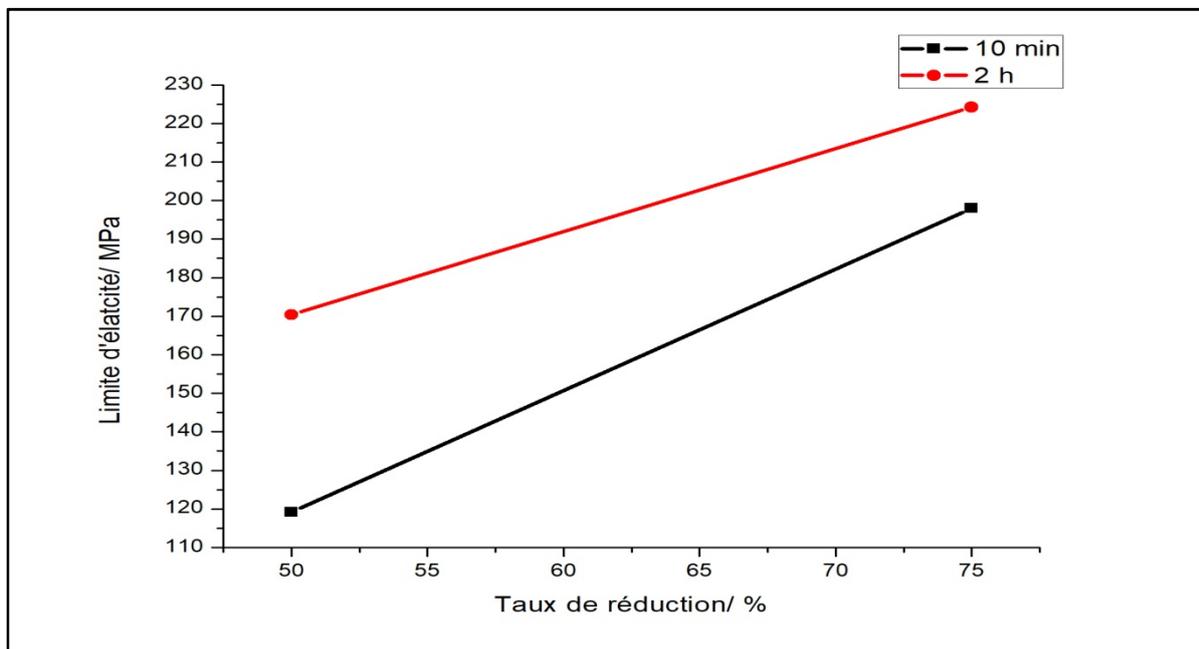


Figure III.31: Variation de la limite d'élasticité en fonction du taux de déformation de l'alliage traité à 400 °C.

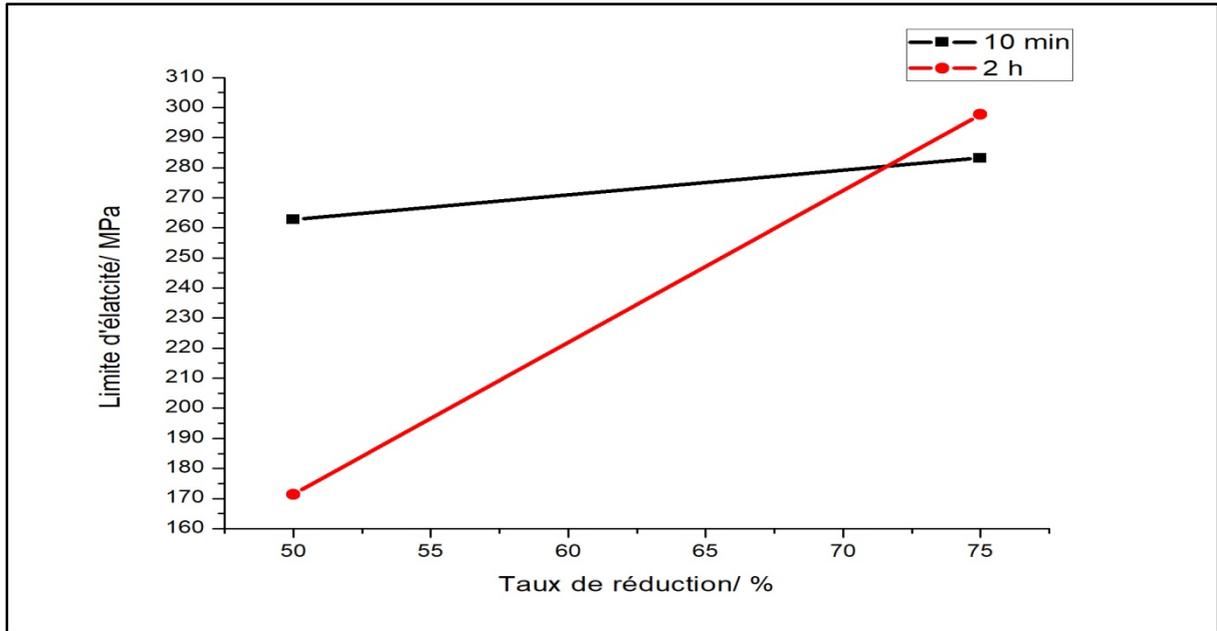


Figure III.32: Variation de la limite d'élasticité en fonction du taux de déformation de l'alliage traité à 500 °C.

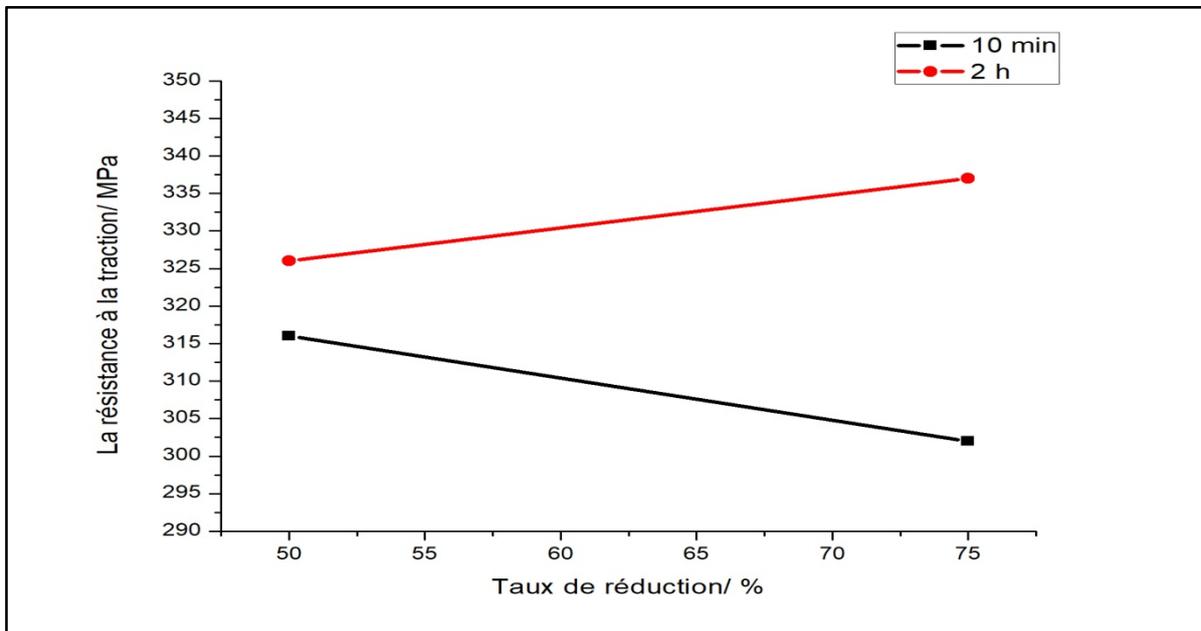


Figure III.33: Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation de l'alliage traité à 400 °C.

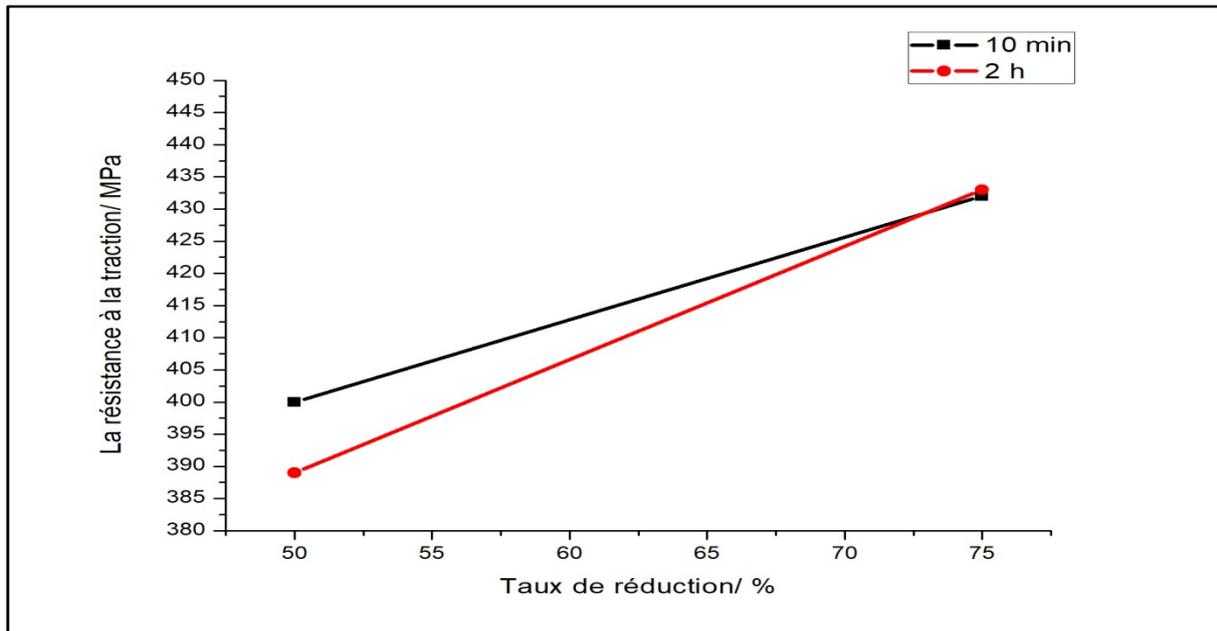


Figure III.34: Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation de l'alliage traité à 500 °C.

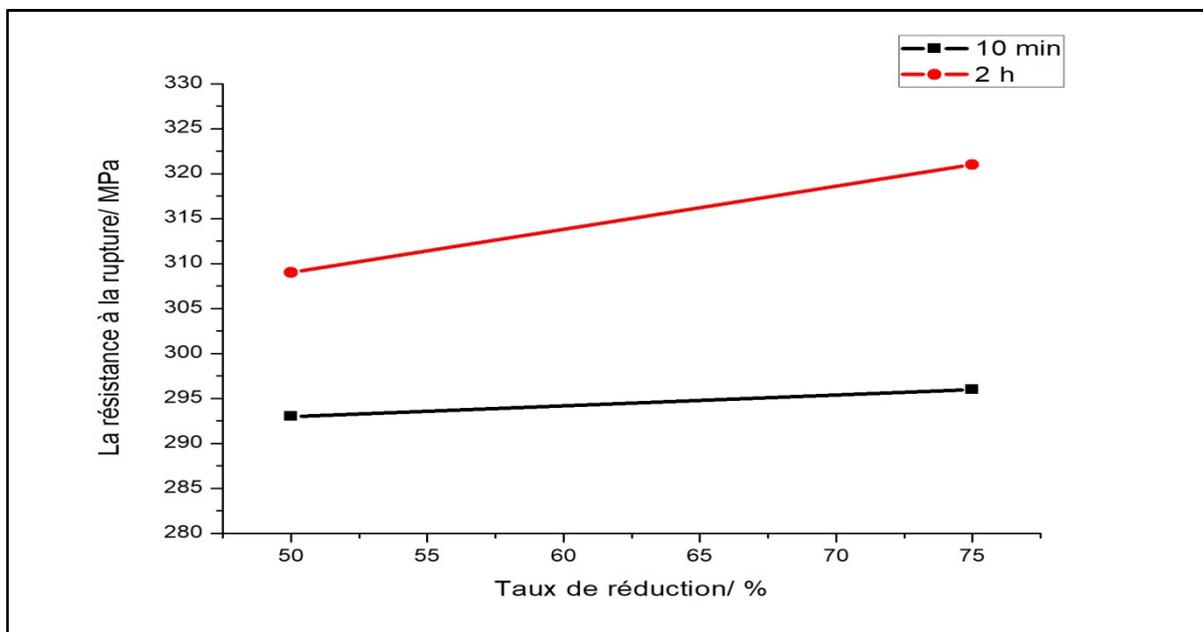


Figure III.35: Variation de la résistance à la rupture en fonction du taux de déformation de l'alliage traité à 400 °C.

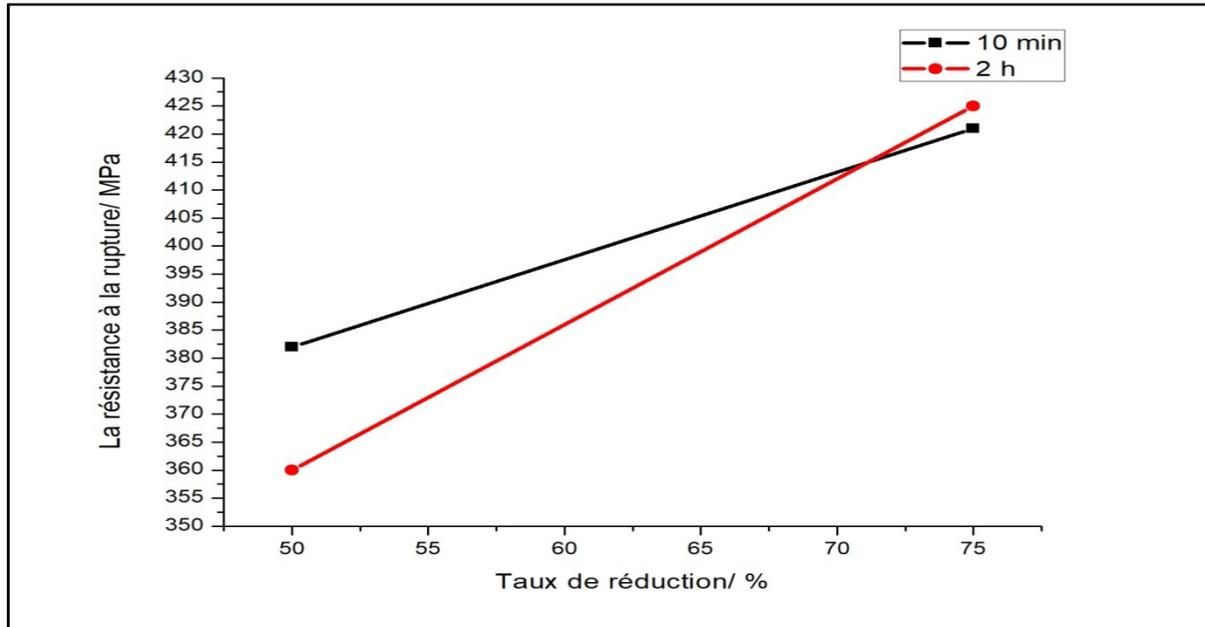


Figure III.36: Variation de la résistance à la rupture en fonction du taux de déformation de l'alliage traité à 500 °C.

## *Conclusion générale*

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire a pour objectif l'étude de l'influence des traitements thermomécaniques sur la microstructure et la résistance mécanique de l'alliage d'aluminium 2017. L'ensemble des résultats ont abouti aux conclusions suivantes :

- La recristallisation est assez rapide à un point où elle s'achève juste après 10 mn de traitement à 400 °C.
- La déformation plastique réduit la ductilité de l'alliage et plus la déformation est importante plus l'alliage est moins ductile. Cette réduction est attribuée au grand nombre de défauts introduits par la déformation.
- La recristallisation augmente la ductilité de l'alliage et réduit la résistance à la traction et la résistance à la rupture. Cet effet est attribué à l'annulation des défauts générés par la déformation plastique lors du recuit de recristallisation.
- La limite d'élasticité augmente avec l'augmentation de la température du traitement, ce qui est probablement dû à une contribution des atomes de soluté (cuivre) au durcissement.
- Dans certains cas, les résultats sont inhabituels et inattendus dont l'interprétation nécessite plus d'investigations. Néanmoins, cette singularité est très probablement due à une mauvaise préparation des éprouvettes des essais de traction et à l'inexactitude dans la mesure de la taille moyenne des grains.

## *Références*

- [1] L'aluminium, IUT Saint-Jérôme, **En Quoi L'aluminium Est Un Métal Indispensable Dans Le Domaine Des Industries ?** p 3.
- [2] GHOMARI Fouad, **science des Matériaux de Construction**, p 1.
- [3] Carte routière technologique canadienne de l'aluminium 2000, 2006, p 20
- [4] Édith Villeneuve, **les traitements thermiques des alliages d'aluminium**, , p 2.
- [5] Alexis Deschamps, **Influence de la prédéformation et des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques des alliages Al-Zn-Mg-Cu**, 2009, p 219.
- [6] Abdelhak fekrache, **étude microstructurale des alliages aluminium-fer**, 2008, p 2.
- [7] Said BENZAADA et M. T. BOUZIANE, **science des matériaux : propriétés et emploi métaux et alliages Tom 2**, 2011, p 28.
- [8] Kessein Éric TILLOUS, **contribution à l'étude de l'aluminium et ses alliages 2214-T6 ET 7050-T74 transformés par oxydation micro-arcs**, 2006, p 9.
- [9] K. Mroczka, A. Wójcicka, P. Kurtykan *acta Metallurgica Slovaca*, vol. 18, n ° 2-3, 2012, p. 82-91.
- [10] Boulemzaoud Khadidja, **analyse thermique des alliages d'aluminium AlMgSi(Cu)**, 2012, p 21.
- [11] ALMET, **informations techniques aluminium**, p 51.
- [12] Jacques-Eric Bidaux, **recristallisation de l'aluminium après écrouissage critique**, 2009, p 16.
- [13] Colombié et Coll, **matériaux MÉTALLIQUES**, Michel 2<sup>e</sup> édition, 2001, p 80, 372.
- [14] Abdelghani May, **étude du comportement cyclique et de l'endommagement par fatigue d'un alliage d'aluminium anisotrope du type 2017A**, 2014, p 27, 27.
- [15] Chenafi Messaoud, **Etude de l'évolution des propriétés des fils tréfilés d'alliage AGS**, 2014, p 2,4.
- [16] Guy Murry **Aide-mémoire Métallurgie 2e édition Métaux • Alliages • Propriétés** © Dunod, Paris, 2004, 2010, p 37, 39.
- [17] EPFL, **travaux pratique de physique**, p 3.

[18] <http://www.euralliage.com/laminage.htm>.

[19] Marc JAMET et Yves DOREMUS, mise en forme de l'aluminium par laminage, 1997, p 02

[20] S. O. Adeosun, O. I. Sekunowo, S.A. Balogun, L.O. Osoba, eEffect of Deformation on the Mechanical and Electrical Properties of Aluminum-Magnesium Alloy, 2011, p 559.

[21] JEAN GAUTHIER, effet du traitement thermique sur les propriétés mécaniques, la microstructure et la fractographie pour l'alliage Al-Si-Cu-Mg, 1994, p 48.

[22] Raymond Langevin, guide d'auto-apprentissage pour les opérateurs en traitement thermique, 2015, p 84.

[23] A.BELAHCENE1, M.S. HAMANI, D.E.HAMMOUDI, influence des traitements thermiques (durcissement structural) sur la propriété de dureté de l'alliage d'aluminium de type A-G10, 2008, p 1.

[24] Traitement thermique des alliages d'aluminium, thermi-Lyon, 2005, p 2.

[25] Emilie BOUSQUET, durabilité des assemblages soudés STIR WELDING (FSW), 20017, p 8.

[26] Ninth Edition, E. Paul DeGarmo, J T. Black, Ronald A. Kohser, MATERIALS AND PROCESS IN MANUFACTURING, 2003, p 38.

[27] Strengthening of Aluminum Alloy 2219 by Thermo-mechanical Treatment, Article in Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, p 3910.

[28] A. Korchunov, M. Polyakova, N. Koptseva, K. Brunelli, M. Breda, M. Dabalà, effect of thermo-mechanical treatments on mechanical properties and residual stresses in cold-drawn wire rods of eutectoid steel, 2016, p 11

[29] Said BENSAADA, phénomène de recristallisation, de précipitation et de dissolution dans les alliages Ni-1,4 at.% In, Ni-6,2 at.% In, Al-15at.%Zn, Al-30 mass.%Zn, Cu-4,6 at.% In, et Mg-8 mass.% Al, p 8.

[30] Ghania BENCHABANE, les mécanismes de recristallisation et de croissance des grains dans les métaux et alliages métalliques légers, 2009, p 18.

[31] Azzouz Ridha, affinement des grains dans les aciers hypoeutectoïdes, 2010, p 23.

[32] S. CANTOURNET, base physiques quantitatives des lois de comportement mécanique, 2017, p 121.

**[33] FARHANI Rebei et DEKHLI Hamza, influence de la déformation à froid sur les propriétés mécaniques et microstructurales des fils d'aluminium tréfilés, 2016, p 7.**

**[34] Marc Blétry, méthodes de caractérisation mécanique des matériaux, 2007, p 6.**

**[35] G. Moulin, factures influençant les propriétés mécaniques, p 3.**

**[36] Roland FORTUNIER, Comportement Mécanique des Matériaux, p 25.**

## *Liste des figures*

<b>Figure I.1</b> : La microstructure développée par un microscope optique.....	04
<b>Figure I.2</b> : Schéma théorique d'une déformation plastique.....	06
<b>Figure I.3</b> : Mise en forme par déformation plastique. ....	08
<b>Figure I.4</b> : Procédé de laminage. ....	09
<b>Figure I.5</b> : Train de laminage. ....	10
<b>Figure I.6</b> : Train de laminage.....	11
<b>Figure I.7</b> : La mise en solution.....	12
<b>Figure I.8</b> : Cycles de traitement thermique des alliages. ....	14
<b>Figure I.9</b> : Evolution de la microstructure au cours de la restauration. ....	16
<b>Figure I.10</b> : Schéma de la recristallisation. ....	17
<b>Figure II.1</b> : Echantillon à l'état initial. ....	18
<b>Figure II.2</b> : Traitement thermique appliqué aux échantillons avant la déformation plastique.....	18
<b>Figure II.3</b> : Laminoir utilisé dans la déformation plastique.....	19
<b>Figure II.4</b> : Machine de polissage mécanique. ....	20
<b>Figure II.5</b> : Microscope optique utilisé. ....	21
<b>Figure II.6</b> : Eprouvette de traction. ....	22
<b>Figure II.7</b> : Machine de traction INSTRON 5969.....	23
<b>Figure II.8</b> : Technique de l'essai de traction. ....	24
<b>Figure III.1</b> : Microstructure de l'alliage 2017 à l'état brut.....	25
<b>Figure III.2</b> : Microstructure de l'alliage 2017 : (a) déformé à 50% et (b) déformé à 75%.....	26
<b>Figure III.3</b> : Microstructure de l'alliage 2017 déformé et traité à 400°C : (a1) déformé à 50% et traité 10mn, (a2) déformé à 50% et traité 2h, (a3) déformé à 75% et traité 10mn et (a4) déformé à 75% et traité 2h. ....	28

<b>Figure III.4 :</b> Microstructure de l'alliage 2017 déformé et traité à 450°C : (b1) déformé à 50% et traité 10mn, (b2) déformé à 50% et traité 2h, (b3) déformé à 75% et traité 10mn et (b4) déformé à 75% et traité 2h. ....	29
<b>Figure III.5 :</b> Microstructure de l'alliage 2017 déformé et traité à 500°C : (c1) déformé à 50% et traité 10 mn, (c2) déformé à 50% et traité 2h, (c3) déformé à 75% et traité. 10 mn et (c4) déformé à 75% et traité 2h.....	30
<b>Figure III.6 :</b> Variation de la taille moyenne des grains en fonction de la température de l'alliage 2017 déformé à 50%.....	31
<b>Figure III.7 :</b> Variation de la taille moyenne des grains en fonction de la température de l'alliage 2017 déformé à 75%.....	32
<b>Figure III.8 :</b> Variation de la taille moyenne des grains en fonction de la durée du traitement à la température 400°C.....	33
<b>Figure III.9:</b> Variation de la taille moyenne des grains en fonction de la durée du traitement à la température 450°C.....	33
<b>Figure III.10:</b> Variation de la taille moyenne des grains en fonction de la durée du traitement pour la température 500°C.....	34
<b>Figure III.11:</b> Variation de la taille moyenne des grains en fonction du taux de réduction à 400°C.....	35
<b>Figure III.12:</b> Variation de la taille moyenne des grains en fonction de taux de réduction à 450°C.....	35
<b>Figure III.13:</b> Variation de la taille moyenne des grains en fonction de taux de réduction à 500°C.....	36
<b>Figure III.14:</b> Courbe de traction réalisée sur l'alliage non-traité.....	37
<b>Figure III.15:</b> Courbe de traction réalisée sur l'alliage déformé à 50% et traité à 400 °C....	37
<b>Figure III.16:</b> Courbe de traction réalisée sur l'alliage déformé à 75% et traité à 400 °C....	38
<b>Figure III.17:</b> Courbe de traction réalisée sur l'alliage déformé à 50% et traité à 500 °C...38	
<b>Figure III.18:</b> Courbe de traction réalisée sur l'alliage déformé à 75% et traité à 500 °C...39	

<b>Figure III.19:</b> Variation de la limite d'élasticité en fonction de la température pour 10 mn de traitement.....	40
<b>Figure III.20:</b> Variation de la limite d'élasticité en fonction de la température pour 2h de traitement.....	41
<b>Figure III.21:</b> Variation de la résistance à la traction en fonction de la température pour 10 mn de traitement.....	41
<b>Figure III.22:</b> Variation de la résistance à la traction en fonction de la température pour 2h de traitement.....	42
<b>Figure III.23:</b> Variation de la résistance à la rupture en fonction de la température pour 10 mn de traitement.....	42
<b>Figure III.24:</b> Variation de la résistance à la rupture en fonction de la température pour 2h de traitement.....	43
<b>Figure III.25:</b> Variation de la limite d'élasticité en fonction de la durée du traitement à 400 °C.....	44
<b>Figure III.26:</b> Variation de la limite d'élasticité en fonction de la durée du traitement à 500°C.....	44
<b>Figure III.27:</b> Variation de la résistance à la traction en fonction de la durée du traitement à 400 °C.....	45
<b>Figure III.28:</b> Variation de la résistance à la traction en fonction de la durée du traitement à 500 °C.....	45
<b>Figure III.29:</b> Variation de la résistance à la rupture en fonction de la durée du traitement à 400 °C.....	46
<b>Figure III.30:</b> Variation de la résistance à la rupture en fonction de la durée du traitement à 500 °C.....	46
<b>Figure III.31:</b> Variation de la limite d'élasticité en fonction du taux de déformation de l'alliage traité à 400 °C.....	47
<b>Figure III.32:</b> Variation de la limite d'élasticité en fonction du taux de déformation de l'alliage traité à 500 °C.....	48

<b>Figure III.33:</b> Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation de l'alliage traité à 400 °C.....	48
<b>Figure III.34:</b> Variation de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation de l'alliage traité à 500 °C.....	49
<b>Figure III.35:</b> Variation de la résistance à la rupture en fonction du taux de déformation de l'alliage traité à 400 °C.....	49
<b>Figure III.36:</b> Variation de la résistance à la rupture en fonction du taux de déformation de l'alliage traité à 500 °C.....	50

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau I.1 :</b> Séries d'alliage d'aluminium.....	02
<b>Tableau I.2 :</b> Composition chimique de l'alliage 2017.....	03
<b>Tableau I.3:</b> Propriétés mécanique de l'alliage 2017. ....	03

## *Résumé*

L'effet des traitements thermomécaniques après mise en solution sur la microstructure et la résistance mécanique de l'alliage 2017 a été étudié. Trois paramètres ont été considérés tels que : le taux de déformation, la température et la durée des traitements et deux techniques de caractérisation complémentaires ont été utilisées : la microscopie optique et les tests de traction. L'ensemble des résultats obtenus montrent que chacun des paramètres considérés est d'un effet considérable sur la microstructure et la résistance mécanique de l'alliage 2017, nous trouvons que la température augmente l'élasticité, la ductilité et réduit la résistance à traction et à la rupture. La déformation diminue la ductilité.

## *ملخص*

إن تأثير معالجة الميكانيك الحرارية بعد عملية التحليل على البنية الميكروسكوبية و المقاومة الميكانيكية للخليط 2017 المدروس. ثلاثة عوامل تكون معتبرة في دراستنا، تأثير دور عملية تصفيح المعدن، درجة الحرارة و مدة المعالجة الحرارية، و هناك تقنيتان متكاملتان مستعملتان في الملاحظة و التمييز: استعمال المجهر البصري (الميكروسكوب)، و تقنية اختبار الجر ، مجموع النتائج المتحصل عليها تبين أن كل من العوامل المستعملة له تأثير معتبر على البنية الميكروسكوبية و المقاومة الميكانيكية على الخليط 2017، نجد أن الحرارة تزيد من المرونة ، الصلابة و تنقص من مقاومة الجر و الانكسار، بينما عملية تصفيح المعدن تنقص من الصلابة.

## *Abstract*

The effect of the thermomechanical treatments after dissolution on the microstructure and the mechanical strength of the alloy 2017 were studied. Three parameters were considered such as: deformation rate, temperature and duration of treatments and two complementary characterization techniques were used: optical microscopy and tensile tests. All the results obtained show that each of the parameters considered is of considerable effect on the microstructure and the mechanical strength of the alloy 2017, we find that the temperature increases the elasticity, the ductility and reduces the tensile strength and at the breakup. Deformation reduces ductility.