



**HAL**  
open science

## Etude\_du\_comportement\_d\_un\_métal\_amorphe\_base\_Zr

Laura Mangourny, Guénaël Germain, Bruno Lavis, Yessine Ayed

► **To cite this version:**

Laura Mangourny, Guénaël Germain, Bruno Lavis, Yessine Ayed.  
Etude\_du\_comportement\_d\_un\_métal\_amorphe\_base\_Zr\_à\_des\_températures\_cryogéniques.  
Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784365

**HAL Id: hal-04784365**

**<https://hal.science/hal-04784365v1>**

Submitted on 15 Nov 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## Étude du comportement d'un métal amorphe base Zr à températures cryogéniques

Laura MANGOURNY(a), Bruno LAVISSE(a), Yessine AYED(a),  
Guénaël GERMAIN(a)

(a) Arts et Métiers, LAMPA, EA1427, Angers

Mail : [laura.mangourny@ensam.eu](mailto:laura.mangourny@ensam.eu)

**Résumé :** Les métaux amorphes, également appelés verres métalliques, sont des nouveaux matériaux toujours en développement afin de répondre aux besoins industriels croissants. Ils se caractérisent par leur structure non cristalline et leur limite d'élasticité élevée, ce qui suscite un intérêt particulier dans des secteurs tels que l'aérospatiale, le biomédical et l'horlogerie. Cependant, leur sensibilité aux températures élevées et leur comportement lors de l'usinage posent des défis, notamment en raison de la recristallisation et la formation de fissures. Pour l'amélioration de leur usinabilité, l'utilisation de l'assistance cryogénique émerge comme une méthode prometteuse pour réduire les efforts de coupe et éviter la recristallisation. L'observation de copeaux distincts, selon qu'il y ait une lubrification cryogénique ou non, motive notre désir de mieux appréhender la physique sous-jacente au comportement interne des métaux amorphes. Cette étude se concentre sur le comportement thermomécanique d'un alliage, le Zr-Inox, à différentes vitesses de déformation et températures, dans le but de comprendre l'impact des températures cryogéniques sur son comportement lors de l'usinage.

**Mots clés :** Verres métalliques, Essai en compression, Assistance cryogénique, Vitesse de déformation, Plasticité, Bande de cisaillement.

## 1 Introduction

L'étude du comportement mécanique des métaux amorphes représente un domaine de recherche crucial dans le développement de ces matériaux avancés pour diverses applications industrielles. Ces matériaux, dépourvus de structure cristalline ordonnée, présentent des propriétés uniques qui suscitent un intérêt important dans des secteurs tels que l'aérospatiale, le biomédical et l'horlogerie, pour des pièces de hautes valeurs ajoutées. Il est bien établi que de légères variations dans la composition des alliages peuvent entraîner des modifications significatives dans leur comportement mécanique interne, notamment en ce qui concerne leur plasticité. ( Li, 2006; Xing, 2001)

Des études antérieures ont révélé qu'à des températures cryogéniques, la limite d'élasticité et le domaine plastique des métaux amorphes deviennent beaucoup plus importants qu'à températures ambiantes (Fig. 1). Ce phénomène est très différent des matériaux cristallins. Il doit être mieux appréhendé et quantifié, surtout pour de très grandes vitesses de déformation. Cependant, il convient de noter que toutes les publications de la littérature ne sont pas unanimes ou sont plus modérées sur l'effet de la cryogénie, en raison notamment de variations dans la composition des métaux amorphes (Jiang, 2012; Li, 2006). La composition de ces alliages joue un rôle crucial dans leur comportement mécanique, et il est donc important de déterminer spécifiquement l'effet de la cryogénie sur notre composition.

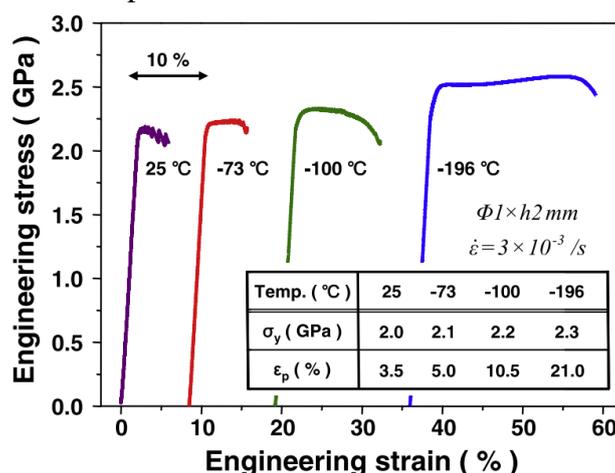


Figure 1: Courbes contrainte/déformation en compression du Cu57Zr43 à 25°C, -75°C, -100°C et -196°C (Kyeu-Sang Yoon, 2010)

Une piste d'investigation prometteuse pour comprendre ce phénomène réside dans l'analyse des bandes de cisaillement (Fig.2), en particulier leur évolution au cours du processus de déformation. Cette évolution peut être simplifiée en quatre étapes distinctes :

1. Déformation et formation de bandes de cisaillements
2. Propagation des bandes de cisaillement
3. Fissure locale le long d'une ou plusieurs bandes de cisaillement majeures
4. Rupture de la bande de cisaillement principale

La deuxième étape représente le domaine de déformation plastique. En effet, plus le nombre de bandes de cisaillement est élevé, plus l'échantillon présente un comportement ductile.

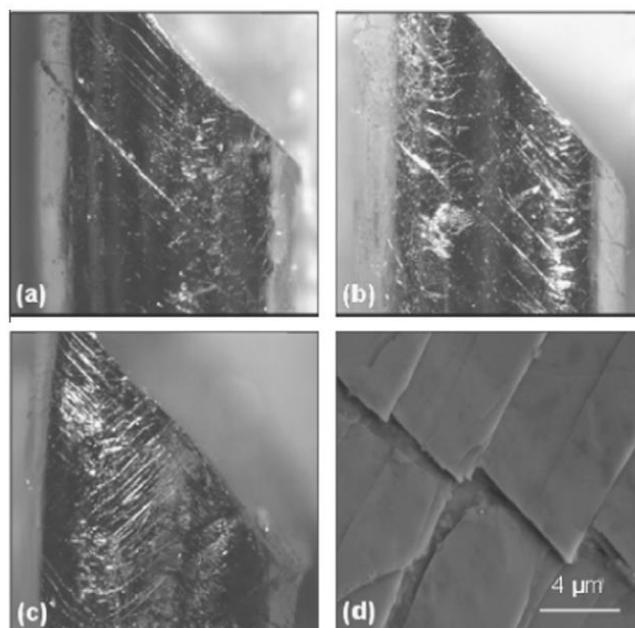


Figure 2: Micrographies optiques enregistrées à partir des surfaces latérales des échantillons fracturés testés à (a) 25°C, (b) -75°C et (c) -196°C et (d) micrographie électronique secondaire de (c). (Kyeu-Sang Yoon, 2010)

Cependant, une question essentielle demeure : pourquoi observe-t-on une formation accrue de bandes de cisaillement à des températures cryogéniques, entraînant ainsi une augmentation du domaine plastique ? Plusieurs hypothèses ont été avancées dans la littérature, mettant en avant notamment l'influence de la viscosité interne du matériau (Kyeu-Sang Yoon, 2010; R. Maaß, 2011) et des processus de nucléation et d'évaporation locales (Sergueeva, 2006; Meduri, 2017; Li, 2006; Zhang, 2003)

Un autre facteur à considérer est la vitesse de déformation, qui peut également influencer le nombre de bandes de cisaillement formées (Fig.3). Cependant, il convient de noter que l'étude de Sergueeva et al. (Sergueeva, 2006) a été réalisée avec une géométrie d'échantillon cubique, une géométrie unique pour des essais de compressions.

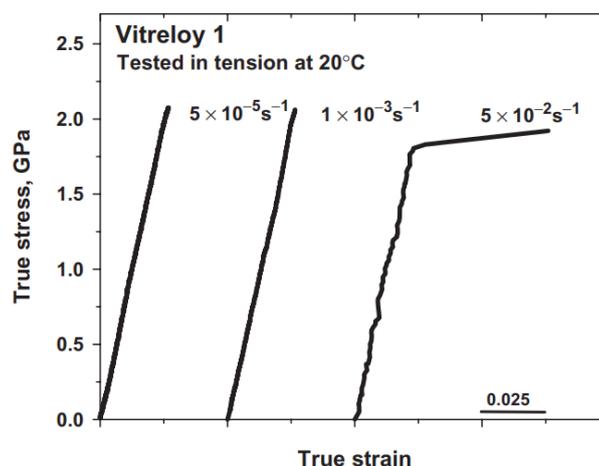


Figure 3: Courbes de traction contrainte-déformation réelles pour un alliage amorphe de base-Zr à température ambiante et à différentes vitesses de déformation (A. V. Sergueeva, 2006)

La complexité intrinsèque de la déformation plastique, exacerbée par la présence de zones de transformation structurale et de volumes libres dans les métaux amorphes, pose des défis considérables en termes de reproductibilité des essais (A. V. Sergueeva, 2006; David D.E. Brennhaugen, 2018) . Ainsi, une approche combinant la microscopie électronique à balayage (MEB) et les courbes contraintes-déformations est indispensable pour une compréhension précise de la plasticité de ces matériaux. (C. Meduri, 2017)

Dans ce contexte, cette étude s'attache à examiner de manière approfondie le comportement mécanique des métaux amorphes, en mettant particulièrement l'accent sur l'impact des températures cryogéniques et des vitesses de déformation sur la formation des bandes de cisaillement et la plasticité du matériau. La figure 4 montre des micrographies MEB d'une fracture obtenue par compression du verre métallique Zr59Cu20Al10Ni8Ti3. La bande de rupture correspond à un cisaillement intense localisé.

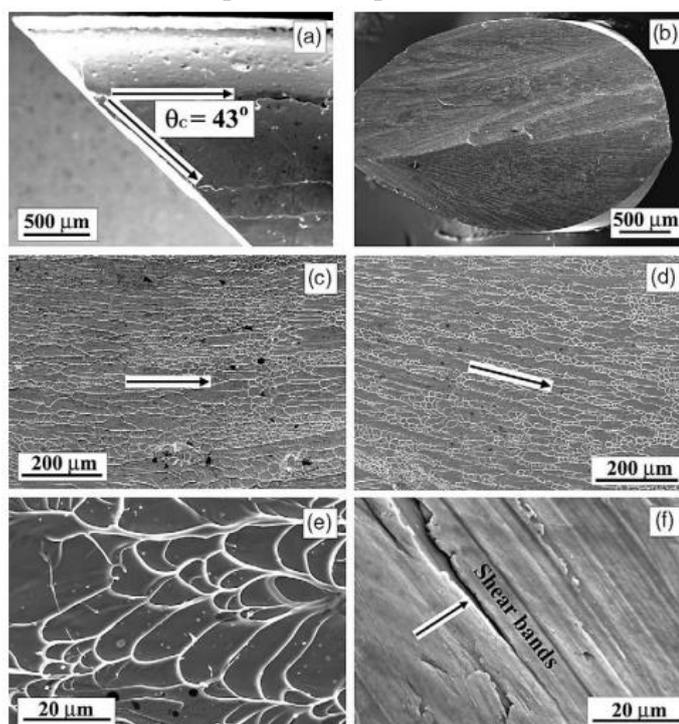


Figure 4: (a) Bande de rupture ; (b) à (e) surface de rupture à différents grossissements ; (f) bandes de cisaillement à la surface de l'échantillon. (C. Meduri, 2017)

## 2 Procédure expérimentale

### 2.1 Mise en place

Pour examiner le comportement mécanique d'un alliage amorphe et l'effet sur la microstructure déformée, des essais de compression uniaxiale seront entrepris à deux températures distinctes, soit  $-180^{\circ}\text{C}$  et  $25^{\circ}\text{C}$ , et à deux vitesses de déformation différentes, à savoir  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  et  $100 \text{ s}^{-1}$ . Chaque essai sera répété 2 fois. Ces essais seront conduits à l'aide du simulateur thermomécanique Gleeble 3500 (Fig.5), équipé d'une capacité de charge de 100 kN, d'une vitesse de déplacement maximale de 1m/s et d'un extensomètre afin de mesurer la déformation de l'éprouvette. Au cours des essais de compression, les échantillons ( $\phi 5 \times 7,5 \text{ mm}$ ) seront positionnés entre deux enclumes en carbure de tungstène, avec des feuilles de graphite à l'interface enclumes/'échantillon pour minimiser les frottements. Les échantillons ont été préalablement préparés pour assurer une très bonne

planéité des surfaces de compression et leur très bonne perpendicularité avec l'axe de l'échantillon.



Figure 5 : Gleeble 3500

## 2.2 Essais cryogéniques (LN2)

Un système a été développé au sein du laboratoire LAMPA pour mener des essais de compression à des températures cryogéniques. La configuration de l'installation cryogénique repose sur l'acheminement du fluide cryogénique (LN2) à travers un tuyau pour immerger l'échantillon. Ce dernier est placé dans une enceinte positionnée autour des deux enclumes pendant toute la durée des essais de compression (Fig.6). Cette enceinte, réalisée en fabrication additive, n'occasionne aucune perturbation sur les mesures des efforts et des déplacements. Cette enceinte est changée à chaque essai.

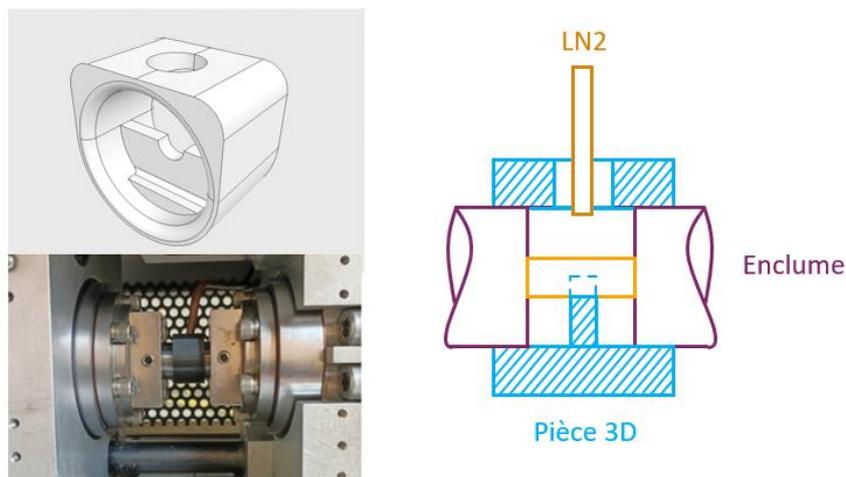


Figure 6 : Configuration des essais de compression à températures cryogéniques

Cependant, il est crucial de souligner qu'il est impossible de souder un thermocouple directement sur l'échantillon, en raison du risque de recristallisation de la matière. Par conséquent, la vérification de la température pendant les essais pose un défi. Afin de pallier cette limitation, une étude préliminaire a été menée. Après avoir effectué plusieurs mesures expérimentales en utilisant un thermocouple de type K, fixé sur un échantillon martyr, nous avons déduit qu'après une immersion de 3 minutes dans le LN2, l'échantillon parvient à atteindre la température cryogénique désirée de  $-180^{\circ}\text{C}$ .

### 3 Résultats et Observations

#### 3.1 Propriétés mécaniques

Suite aux essais de compression, des courbes contrainte/déformation ont été obtenues, révélant une évolution de la plasticité du Zr-Inox à différentes températures (Fig.7). La raideur du montage apparaissant sur les résultats, les courbes sont corrigées en se basant sur le module Young donné par notre fournisseur. Il est observé que la plasticité semble augmenter à des températures cryogéniques. Cependant, il est essentiel de noter que ces résultats doivent être interprétés avec prudence en raison de la variabilité inhérente des essais. La complexité de la déformation plastique, combinée à des facteurs tels que la présence de zones de transformation structurelle et de volumes libres dans les métaux amorphes, rend difficile la reproductibilité des essais. Par conséquent, ces observations initiales doivent être revalidées par des expériences supplémentaires pour confirmer toute tendance significative dans le comportement mécanique du Zr-Inox aux températures cryogéniques et aux vitesses de déformation examinées.

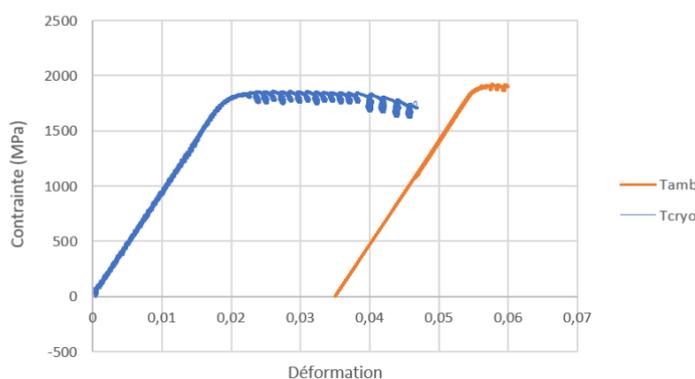


Figure 7 : Courbes contraintes déformation à  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  à température cryogénique et à température ambiante.

Les résultats indiquent une contrainte maximale et un point de rupture aux alentours des 1800 MPa pour chaque cas étudié, montrant une résistance mécanique indépendante des conditions de test (Figure 8). Les barres d'erreurs précisent les valeurs maximale et minimale pour chaque cas. Nous notons également des difficultés de répétabilité à température ambiante et particulièrement à  $100 \text{ s}^{-1}$ .

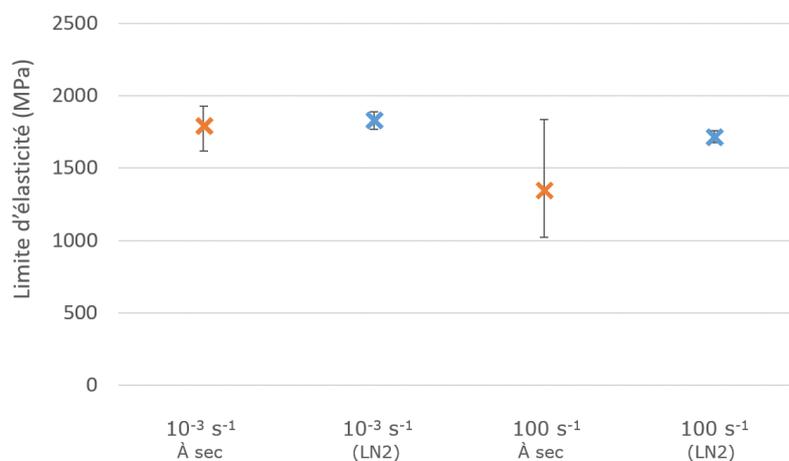


Figure 8: Résistance mécanique en fonction des conditions d'essais

### 3.2 Observations du faciès de la bande de rupture

Les observations au MEB ont révélé des différences significatives entre les échantillons testés à différentes températures et vitesses de déformation :

En règle générale, les essais réalisés à une vitesse de déformation de  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  présentent des surfaces de rupture similaires à celles observées dans la littérature scientifique antérieure (C. Meduri, 2017). Pour cette vitesse, les zones déformées à température cryogénique semblent avoir un réseau de veines plus homogène par rapport aux essais à température ambiante (Fig.9).

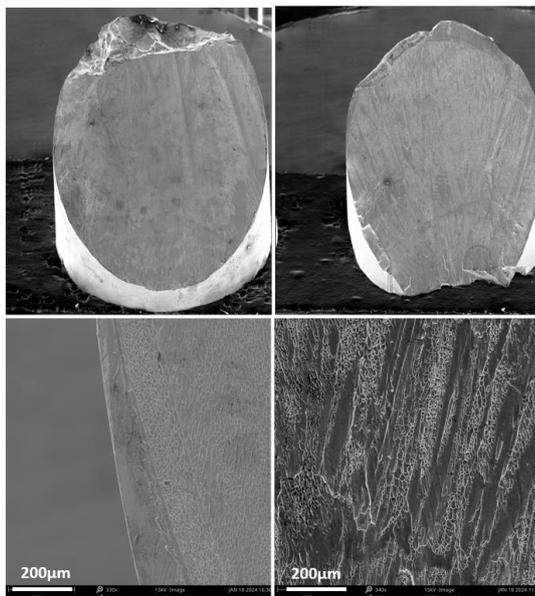


Figure 9: Faciès de rupture à température cryogénique (à gauche) et à température ambiante (à droite)

À une vitesse de déformation de  $100 \text{ s}^{-1}$ , les observations MEB ont montré une pluralité de veines de déformation, mais également des surfaces de rupture plus rugueuses et irrégulières (Fig.10).

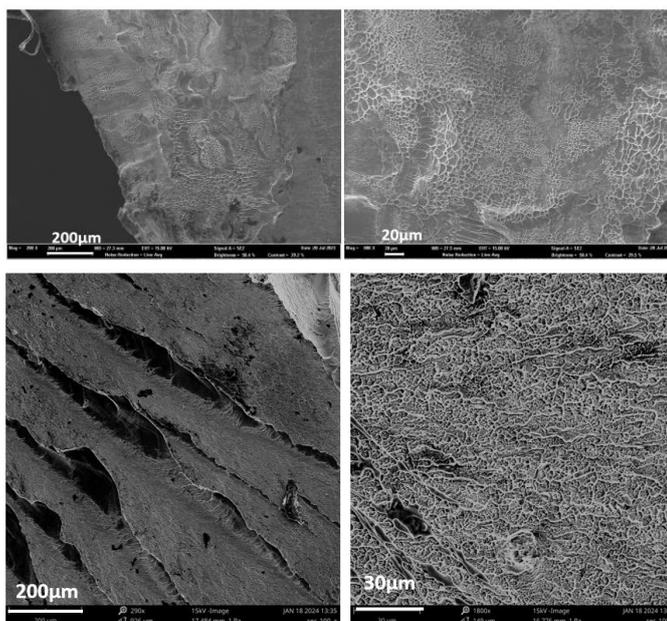


Figure 10: Faciès de rupture ( $100 \text{ s}^{-1}$ , température ambiante)

## 4 Conclusion

Les résultats de cette étude permettent d'en apprendre un peu plus sur les métaux amorphes. Après avoir observé en amont de cette étude des copeaux différents selon l'utilisation d'azote liquide ou non, les courbes contraintes/déformation et l'utilisation du microscope électronique à balayage mettent en lumière d'importantes disparités quant au comportement mécanique de l'alliage amorphe Zr-Inox soumis à des températures cryogéniques. Nous concluons également que la vitesse de déformation ne semble pas ou peu impacter le matériau sur ces essais.

Ces résultats améliorent notre compréhension des mécanismes de déformation des métaux amorphes à des températures cryogéniques et ouvrent la voie à de futures recherches visant à optimiser leur utilisation dans diverses applications industrielles.

## Références

- A. V. Sergueeva, N. A. (2006). *Shear band formation and ductility in bulk metallic glass*. *Philosophical Magazine*, 85(23).
- BOUCHNAK, T. B. (2010). *ETUDE DU COMPORTEMENT EN SOLlicitATIONS EXTRÊMES ET DE L'USINABILITE D'UN NOUVEL ALLIAGE DE TITANE AERONAUTIQUE : LE TI555-3*. *Sciences des Métiers de l'Ingénieur*, 232. Arts et Métiers ParisTech - Centre de Angers.
- C. Meduri, M. H. (2017). *Effect of temperature on shear bands and bending plasticity of metallic glasses*. *Journal of Alloys and Compounds*.
- Chao Ge, Q. Y. (2020). *On dynamic response and fracture-induced initiation characteristics of aluminum particle filled PTFE reactive material using hat-shaped specimen*. *Materials and Design*, 188( 108472).
- David D.E. Brennhagen, K. G. (2018). *Tensile properties of Zr70Ni16Cu6Al8 BMG at room and cryogenic*. 742.
- David D.E. Brennhagen, K. G. (2018). *Tensile properties of Zr70Ni16Cu6Al8 BMG at room and cryogenic temperatures*. *Journal of Alloys and Compounds*, 742.
- Hongqi Li, C. F. (2006, Mars). *Compressive Behavior of a Zr-Based Metallic Glass at Cryogenic*. *ADVANCED MATERIALS*, pp. 752-754.
- Jiang, F. e. ( 2012). *Ambient temperature embrittlement of a Zr-based bulk metallic glass*. *Materials Science and Engineering: A* 549, 14–19 .
- K. Mondal, G. K. (2007, Aout 1). *Large apparent compressive strain of metallic glasses*. *Philosophical Magazine Letters*, pp. 625-635.
- Kyeu-Sang Yoon, M. L.-C. (2010, Juin 12). *Cryogenic temperature plasticity of a bulk amorphous alloy*. *Acta Materialia* .
- L.-Q. Xing, Y. L. (2001). *Enhanced plastic strain in Zr-based bulk amorphous alloys*. 64.
- Li, H. F. (2006). *Compressive Behavior of a Zr-Based Metallic Glass at Cryogenic Temperatures*. *Advanced Materials* 18, 752–754.
- R. Maaß, D. K. (2011, Novembre 3). *Single shear-band plasticity in a bulk metallic glass at cryogenic temperatures*. *Scripta Materialia*, pp. 231-234.
- Xu Zejian, L. Y. (2019). *Thermo-viscoplastic behavior and constitutive modeling of pure copper under high-strain-rate shear condition*. 129.
- Z.F. Zhang, J. E. (2003). *Difference in compressive and tensile fracture mechanisms of Zr59Cu20Al10Ni8Ti3 bulk metallic glass*. 51( 1167–1179).