

## Modélisation du coefficient de réflexion $R(\theta)$ de l'alliage à mémoire de forme TiNi équiatomique.

Rekia BOUAITA, Saida CHOUF, Amar BOUDOUR, Youcef BOUMAIZA

Laboratoire LEAM, Département de Physique, Faculté des sciences,  
Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie.

[Rekia.bouaita@yahoo.fr](mailto:Rekia.bouaita@yahoo.fr)

### Résumé

Le but de notre travail concerne la modélisation du coefficient de réflexion  $R(\theta)$  d'un alliage à mémoire de forme TiNi équiatomique ayant subi différents traitements thermiques. Nous avons pu ainsi déterminer la vitesse de Rayleigh de deux manières différentes: à partir de la modélisation ainsi que des résultats expérimentaux des différentes vitesses des ondes acoustiques générées, (longitudinale et transversale), obtenues par la technique de la microéchographie acoustique en utilisant la formule de Victorov. D'autre part, les paramètres élastiques de ce matériau, (module de Young "E", module de cisaillement "G"), ont pu être également déduits.

**Mots clés:** *Microéchographie acoustique, Coefficient de réflexion  $R(\theta)$ , Paramètres élastiques, Alliage à mémoire de forme TiNi.*

### 1. Introduction

Les développements des techniques de Contrôle Non Destructif (CND), ont fortement contribué aux progrès des méthodes de fabrication de nouveaux matériaux. Dans cette étude, nous avons utilisé la technique de la microéchographie acoustique pour caractériser un matériau dit à mémoire de forme [1] à savoir l'alliage  $Ti_{50}Ni_{50}$  [2]. C'est un matériau massif et isotrope, c.à.d il présente les mêmes caractéristiques et propriétés physiques quelque soit la direction cristallographique considérée. Notre travail consiste à effectuer des mesures des vitesses des ondes acoustiques et à modéliser le coefficient de réflexion  $R(\theta)$  de ce type de matériau afin de déterminer la vitesse des ondes de surfaces (Rayleigh) et d'en déduire ses paramètres élastiques.

### 2. Principe et technique acoustique

La technique acoustique est une méthode qui peut se décrire en deux techniques: active et passive. Le principe de la méthode active est basé sur l'étude de la réponse d'un milieu soumis à une excitation générée par le système de mesure. Dans ce cas, les paramètres d'excitation sont maîtrisés [3]. La technique passive enregistre le résultat d'une excitation issue directement du système étudié et les

paramètres d'excitation sont totalement dépendants des mécanismes sources.

Le principe de la méthode de l'échographie ultrasonore consiste en un transducteur qui émet une onde ultrasonore dans un fluide. Une partie de cette onde va pénétrer dans le matériau et l'autre partie va être réfléchiée par l'interface puis va être reçue par le transducteur. Ce dernier sert donc à la fois d'émetteur et de récepteur. Le premier écho reçu par le transducteur est appelé écho de face avant ou écho d'interface (voir Fig. 1).

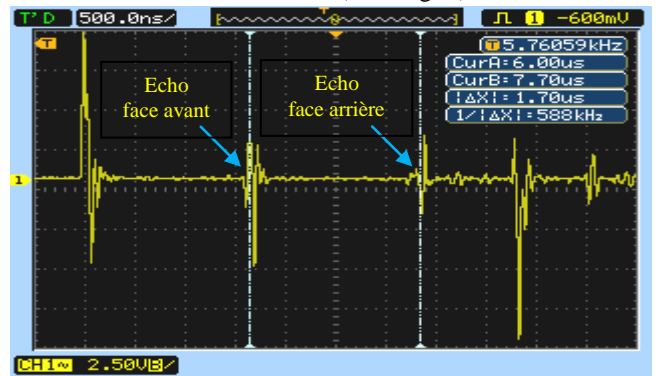


Figure 1: Principe de l'échographie ultrasonore.

L'écho reçu correspond donc à un aller-retour de l'onde dans le matériau. Le temps de parcours " $\Delta t$ " de l'onde dans le matériau, l'épaisseur " $e$ " du matériau et la vitesse de propagation " $V$ " de l'onde ultrasonore dans le matériau sont alors reliés par l'équation suivante:

$$\Delta t = \frac{2e}{V} \quad (1)$$

D'où on peut déduire les relations suivantes:

$$V_L = \frac{2e}{\Delta t} \quad (\text{vitesse longitudinale}) \quad (2)$$

$$V_T = \frac{V_L}{\sqrt{2}} \quad (\text{vitesse transversale}) \quad (3)$$

La vitesse de l'onde de Rayleigh peut être déduite de la relation de Viktorov comme suit [4]:

$$V_R \approx V_T \frac{0,718 - \left[ \frac{V_T}{V_L} \right]^2}{0,75 - \left[ \frac{V_T}{V_L} \right]^2} \quad (4)$$

## 2.1. Coefficient de réflexion $R(\theta)$

Une méthode de calcul de l'expression de  $R(\theta)$ , utilisant le bilan mécanique, la continuité des contraintes et des déplacements à l'interface, a été développée par Brekhovskikh [5].

Le coefficient de réflexion pour les matériaux massifs est donné par l'expression suivante [6]:

$$R(\theta) = \frac{Z_l \cos^2 2\theta_s + Z_s \sin^2 2\theta_s - Z_0}{Z_l \cos^2 2\theta_s + Z_s \sin^2 2\theta_s + Z_0} \quad (5)$$

Où:  $Z_0$  est l'impédance acoustique du liquide;

$Z_l$  et  $Z_s$  sont respectivement les impédances acoustiques longitudinale et transversale du solide.

En posant l'impédance totale du solide:

$$Z_{TOT} = Z_l \cos^2 2\theta_s + Z_s \sin^2 2\theta_s \quad (6)$$

Nous obtenons la relation du coefficient de réflexion très connue en acoustique, soit :

$$R(\theta) = \frac{Z_{TOT} - Z_0}{Z_{TOT} + Z_0} \quad (7)$$

Dans le cas le plus général et sous une incidence quelconque, les angles de réfraction  $\theta_l$  et  $\theta_s$ , et par suite les impédances acoustiques  $Z_l$  et  $Z_s$ , sont des nombres complexes. La fonction de réflexion peut s'écrire alors sous la forme complexe:

$$R(\theta) = \Gamma \exp(j\xi) \quad (8)$$

Où:  $\Gamma$  est le module de  $R(\theta)$  et  $\xi$  sa phase.

Dans le cas d'un matériau massif, on relève des variations de phase et d'amplitude au voisinage des angles critiques: longitudinal, transversal et Rayleigh, ce qui nous permet de calculer les vitesses des différents modes. Les théories concernant la propagation des ondes mécaniques dans les matériaux isotropes montrent que deux ondes de volume peuvent se propager. Ces ondes dites longitudinales et transverses ont des vitesses que nous noterons  $V_L$  et  $V_T$ .

Lorsque l'angle d'incidence d'une onde, (par rapport au plan de l'échantillon), devient très important et atteint une valeur critique, on remarque que l'on a trois ondes: onde longitudinale, onde transverse et onde de Rayleigh. Ce qui nous permet déterminer les constantes élastiques à partir des vitesses de ces ondes.

## 3. Résultats et discussions

### 3.1 Détermination des vitesses

Les différentes vitesses des ondes acoustiques, (longitudinales, transversales) sont déterminées expérimentalement en fonction des différents traitements thermiques appliqués à l'alliage à mémoire de forme  $Ti_{50}Ni_{50}$ . Les résultats obtenus, par la méthode échographique, sont reportés dans le tableau 1.

| Ech. | Traitements | $V_L$ ( $ms^{-1}$ ) | $V_T$ ( $ms^{-1}$ ) |
|------|-------------|---------------------|---------------------|
| "A"  | Brut        | 5165,98             | 3616,18             |
| "B"  | Homogénéisé | 4863,66             | 3404,56             |
|      | 50 cycles   | 4889,63             | 3422,74             |
|      | Chauffé     | 4859,44             | 3401,60             |
|      | Refroidit   | 4859,44             | 3401,60             |

Tableau 1: Variations des vitesses longitudinale et transversale de l'alliage  $Ti_{50}Ni_{50}$  en fonction des différents traitements thermiques appliqués.

Après avoir effectué les différents traitements thermiques, on remarque que les vitesses longitudinale et transversale diminuent sensiblement par rapport à celles de l'échantillon "A" (échantillon de référence n'ayant subi aucun traitement).

L'échantillon B a subi plusieurs traitements: un traitement d'homogénéisation, un cyclage entre  $-40^\circ C$  et  $+100^\circ C$  dans le but de faire apparaître la phase pré-martensitique "R". Ce dernier traitement induit une légère augmentation des vitesses longitudinale et transversale par rapport à celles obtenues dans le cas de l'homogénéisation.

Le troisième traitement consiste en un chauffage de température de  $-40^\circ C$  jusqu'à la température ambiante où est effectuée la mesure. Il est à noter que pour une bonne prise de la température, l'échantillon est maintenu 5min à  $-40^\circ C$  avant d'effectuer le chauffage. Ce traitement a pour but d'étudier la propagation des ondes acoustiques à partir de l'état martensitique.

Enfin, le quatrième et dernier traitement est identique au précédent, à la différence que l'échantillon au lieu d'être chauffé, est refroidi depuis la température de  $100^\circ C$  jusqu'à l'ambiante. Ce traitement a pour but d'étudier la propagation des ondes acoustiques dans la phase "R". Rappelons que cette phase pré-martensitique n'a pu apparaître qu'après le traitement de cyclage imposé à l'échantillon (50 cycles).

On peut noter que les deux derniers traitements, (chauffage et refroidissement), induisent une très légère diminution des vitesses de propagations des ondes acoustiques dans l'alliage  $Ti_{50}Ni_{50}$ , comparées à celles de l'échantillon de référence, mais conduisent à des valeurs de vitesses  $V_L$  et  $V_T$  identiques. Les résultats obtenus ont permis de faire la modélisation du pouvoir réflecteur  $R(\theta)$  et de déterminer la vitesse de l'onde de Rayleigh.

### 3.2 Modélisation du pouvoir réflecteur $R(\theta)$

On utilise un programme de calcul qui permet de déterminer le coefficient de réflexion  $R(\theta)$ , (module et phase), en fonction de l'angle d'incidence  $\theta$ . Sachant que l'angle critique  $\theta_R$  correspond à un changement de phase de  $2\pi$  de la phase du coefficient de réflexion  $R(\theta)$ . Cette modélisation est effectuée à partir des résultats expérimentaux obtenus par échographie [3].

Les figures 2a et 2b représentent respectivement les variations de la phase et de l'amplitude du coefficient de réflexion  $R(\theta)$  de l'alliage  $Ti_{50}Ni_{50}$  et ce pour les différents traitements thermiques appliqués.

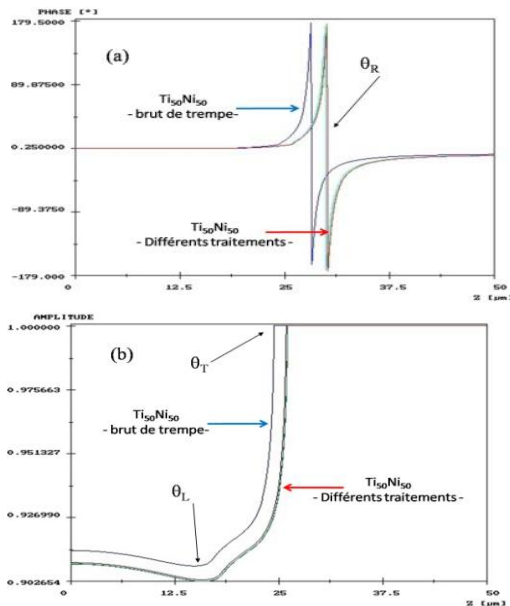


Figure 2: Variation du coefficient de réflexion  $R(\theta)$  pour les différents traitements ( $F = 30$  MHz).

(a) la phase (b) l'amplitude

Les différents traitements thermiques appliqués à l'échantillon "B" n'apportent pratiquement aucune variation sur la phase (figure 2a) et sur l'amplitude (figure 2b). Cependant, nous pouvons observer un léger déplacement des angles critiques vers les valeurs plus élevées au fur et à mesure que le traitement change.

### 3.3 Détermination des vitesses de Rayleigh à partir du coefficient de réflexion $R(\theta)$

Dans le tableau 2, sont portées les vitesses de Rayleigh en fonction des différents traitements thermiques.

On peut relever une légère différence, non significative, entre les deux valeurs de la vitesse de Rayleigh déterminée par les deux méthodes (Viktorov et  $R(\theta)$ ).

| Ech. | Traitements | $V_R^*$ ( $ms^{-1}$ )<br>(Viktorov) | $V_R^{**}$ ( $ms^{-1}$ )<br>(Snell Descarte) |
|------|-------------|-------------------------------------|--|
| "A"  | Brut        | 3099,58                             | 3169,10                                      |
| "B"  | Homogénéisé | 2893,87                             | 2986,46                                      |
|      | 50 cycles   | 2909,32                             | 3004,54                                      |
|      | Chauffé     | 2891,39                             | 2942,71                                      |
|      | Refroidit   | 2891,39                             | 2942,71                                      |

Tableau 2: Détermination de la vitesse de Rayleigh  $V_R$  de  $Ti_{50}Ni_{50}$ .

### 3.4 Détermination des paramètres élastiques

Les paramètres élastiques  $E$  et  $G$  sont déterminés à partir des résultats de mesures obtenus en fonction des traitements thermiques utilisés, (voir tableau 3).

| Ech. | Traitements | $E$ (GPa) | $G$ (GPa) |
|------|-------------|-----------|-----------|
| "A"  | Brut        | 173,46    | 84,99     |
| "B"  | Homogénéisé | 153,75    | 75,34     |
|      | 50 cycles   | 155,40    | 76,14     |
|      | Chauffé     | 153,49    | 75,21     |
|      | Refroidit   | 153,49    | 75,21     |

Tableau 3: Evolution des paramètres élastiques de l'alliage à mémoire de forme  $Ti_{50}Ni_{50}$ .

On remarque que les différents traitements thermiques appliqués, (échantillon "B"), n'ont pas apporté de modifications importantes et notables à la microstructure du matériau, ce qui explique la faible variation des paramètres élastiques. Par contre, une comparaison entre l'échantillon de référence A et l'échantillon B fait apparaître une très grande différence entre les paramètres élastiques.

## 4. Conclusion

Dans le présent travail, nous avons pu mettre en évidence l'influence des traitements thermiques sur les différentes vitesses acoustiques, (longitudinale, transversale et Rayleigh), ainsi que sur les différents paramètres élastiques  $E$  et  $G$  dans le cas de l'alliage  $Ti_{50}Ni_{50}$ .

## Références

- [1] S. Belkahla, H. Flores Zuniga, G. Guenin, *Elaboration and characterization of new low temperature shape memory alloys Cu-Al-Be type*, Materials Science and Engineering A, Vol. A169, (1993), pp. 119-124.
- [2] S. Chouf, M. Benchiheub, S. Belkahla, *Study of the applied stress on the transformation behaviour for the equiatomic shape memory alloy Ti-Ni*, Advances in Materials and Processing Technologies, (2016), pp. 1-6.
- [3] T.Tahraoui, A.Boudour, Y.Boumaiza, *Étude par microscopie acoustique de l'effet d'atténuation transversale et longitudinale sur les modes de propagation dans les structures monocouches et multicouches*, Laser acceleration of particles in plasma, V 10, (2009), pp 227-235.
- [4] I. A. Viktorov, *In Rayleigh and Lamb waves, physical theory and application*, Plenum Press, New York, (1967).
- [5] L. M. Brekhovskikh, O. A. Godin, *Acoustic of layered media I: plane and quasi-plane waves*, Springer-Verlag, Berlin, (1990).
- [6] T.Tahraoui, Y.Boumaiza, A.Boudour, *Ultrasonic study of the elastic properties of superconducting materials*, Optoelectronics and advanced materials – rapid communications, vol 4,(2010), pp 1771-1774.