

Modules d'élasticité du béryllium en fonction de la température

Depuis 2005, le volume de publications concernant le béryllium n'a cessé d'augmenter, en particulier dans le domaine des équations d'état et de la détermination des constantes d'élasticité [1,2]. Dans ce contexte, nous proposons la détermination des modules d'élasticité de polycristaux de béryllium par une méthode ultrasonore dans la gamme de température $T \in [300-1\,000]$ K. Du fait du comportement atypique du béryllium (coefficient de Poisson très faible), l'approche et l'interprétation des résultats sont globales afin de proposer des tendances d'évolution cohérentes des modules d'élasticité en fonction de la température.

M.-H. Nadal • L. Bourgeois • F. Clément • G. Ravel-Chapuis CEA - Valduc

Le béryllium reste un matériau aux propriétés mécaniques exceptionnelles (coefficient de Poisson le plus faible de la famille des métaux, faible densité et comportement fragile) et optiques remarquables (transparent aux rayons X et modérateur neutronique) mais, pour lequel, les données expérimentales sont relativement rares.

L'objectif principal de ce travail est de réactualiser les données expérimentales concernant la dépendance en température des modules d'élasticité, en rappelant que les données de référence [3] datent de 1972, et que les derniers travaux expérimentaux de 2004 [4] ne traitent que de données expérimentales sur béryllium à la température ambiante.

Résultats

La détermination des modules d'élasticité suppose la connaissance de l'évolution de la masse volumique du matériau (pour le béryllium, $1,85 \text{ kg/m}^3$ à la température ambiante, déduite du coefficient de dilatation linéaire en fonction de la température [2,5]) et des vitesses des ondes élastiques. Les vitesses des ondes de polarisation longitudinale et transversale du béryllium sont très élevées (tableau 1), comparées à d'autres matériaux (d'un facteur 2 par rapport à l'acier et 3 par rapport au tantale).

La compilation des données sur la masse volumique et les vitesses ultrasonores permet de déterminer de manière cohérente les différents modules d'élasticité, à savoir le module de Young (E), le module de cisaillement (G), le module d'incompressibilité adiabatique (B_S) et le coefficient de Poisson (ν) [5]. Un des points forts de cette étude est de traiter les données expérimentales de façon globale, en s'efforçant de maîtriser les incertitudes relatives sur les vitesses. La détermination des tendances d'évolution des vitesses des ondes de polarisation longitudinale et transversale en fonction de la température permet une approche globale cohérente (tableau 1).

Modules d'incompressibilité adiabatique (B_S) et de cisaillement (G)

La tendance globale de $B_S(T)$ et $G(T)$ est de décroître légèrement lorsque la température augmente (figures 1 et 2). Le domaine global de variation intégrant les incertitudes est indiqué par la région hachurée. Ces résultats conduisent aux commentaires suivants :

- > nos résultats expérimentaux sont en bon accord avec les calculs *ab initio* [2] (figures 1 et 2, ligne en pointillés). La zone hachurée indique le domaine d'incertitude sur les données expérimentales alors que les calculs *ab initio*

Tableau 1. Évolution des vitesses d'ondes acoustiques en fonction de la température dans la gamme $T \in [300 ; 1000]$ K.

Vitesses des ondes acoustiques	Température (K)	Incertitude relative (%)	Incertitude absolue (m.s^{-1})	Équation relative à l'évolution des vitesses en fonction de la température	
Vitesse de polarisation longitudinale V_L (m.s^{-1})	300	1	132	V_L à T ambiante	13 150
	1 000	3	392	$V_L = f(T)$	$13\,150 - 0,221 T + 6,14 * 10^{-5} T^2$
Vitesse de polarisation transversale V_T (m.s^{-1})	300	1	90	V_T à T ambiante	9 030
	1 000	2	178	$V_T = f(T)$	$9\,092 - 0,231 T + 4,54 * 10^{-5} T^2$

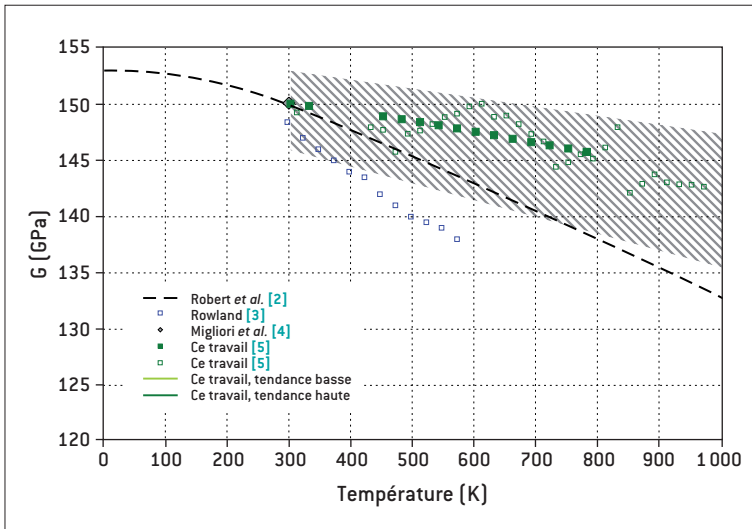


Figure 1. Évolution du module de cisaillement (G) en fonction de la température.

Les données expérimentales issues de ce travail [5] pour deux séries d'échantillons (dont les procédés de fabrication sont différents) sont comparées à celles connues à la température ambiante [3,4] et aux calculs *ab initio* [2].

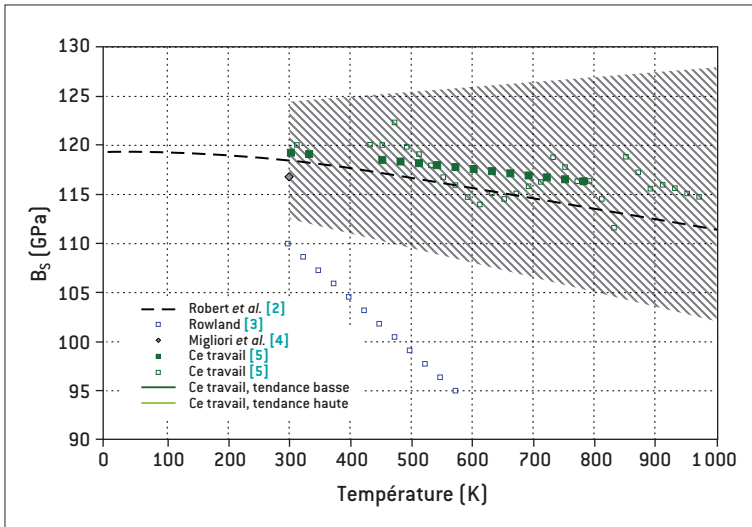


Figure 2. Évolution du module d'incompressibilité adiabatique (B_s) en fonction de la température.

Les données expérimentales issues de ce travail [5] pour deux séries d'échantillons (dont les procédés de fabrication sont différents) sont comparées à celles connues à la température ambiante [3,4] et aux calculs *ab initio* [2].

sont réalisés à 5% près [2];

> les résultats de la référence majeure de Rowland *et al.* [3] obtenus sur un monocristal de béryllium sont remis en question. Même s'il faut rester prudent en termes de transposition des données d'un monocristal à un polycristal, cette référence est la seule nous permettant de déduire les modules d'élasticité par les techniques

classiques de moyenne sur les cristallites (Voigt, Reuss et Hill). En comparant les résultats, les valeurs de B_s en fonction de la température apparaissent complètement différentes (figure 2). L'écart est moins significatif pour l'évolution globale de $G(T)$.

Conclusion

Cet article résume nos travaux concernant la mise à jour de l'évolution des modules d'élasticité dans la gamme de température $T \in [300-1000]$ K (soit encore $T/T_f \in [0,2; 0,65]$, avec T_f la température de fusion du béryllium) d'échantillons massifs de béryllium polycristallin isotrope. La méthode de caractérisation retenue est ultrasonore.

Les principaux faits marquants de ce travail sont: *i*) les valeurs de B_s et de G à la température ambiante sont cohérentes et proches de la valeur expérimentale [4]. Cette comparaison apporte des éléments de validation de nos résultats car les mesures expérimentales de cette référence ont été obtenues avec une grande précision à la fois sur monocristal et polycristal de béryllium; *ii*) l'évolution des modules d'élasticité dépend principalement du profil de densité en fonction de la température. La variation des vitesses des ondes élastiques vient pondérer la variation résultante des modules d'élasticité; *iii*) les évolutions de $B_s(T)$ et de $G(T)$ sont sensiblement différentes de celles de la littérature. Cependant, l'accord global de l'ensemble des données acquises dans ce travail corroboré par les calculs *ab initio* [2] tend à remettre très fortement en question les mesures de Rowland *et al.* [3].

RÉFÉRENCES

[1] G. ROBERT, P. LEGRAND, S. BERNARD, "Modélisation *ab initio* du diagramme de phase solide à basse pression et haute température du béryllium", *Chocs Avancées 2009*, p.20-21 (2010).
 [2] G. ROBERT, P. LEGRAND, S. BERNARD, "Multiphase equation of state and elastic moduli of solid beryllium from first principles", *Phys. Rev B*, **82**, 104118 (2010).
 [3] W.D. ROWLAND, "The determination of the elastic constants of beryllium in the temperature range 25 to 300°C", *J. Phys. F. Metal. Phys.*, **2**(2), p. 231-236 (1972).
 [4] A. MIGLIORI, H. LEBDETTER, D. J. THOMA, T. W. DARLING, "Beryllium's monocystal and polycystal elastic constants", *J. Appl. Phys.*, **95**(5), p. 2436-2440 (2004).
 [5] M.-H. NADAL, L. BOURGEOIS, "Elastic moduli of beryllium versus temperature: experimental data updating", *J. Appl. Phys.*, **108**, 033512 (2010).