



HAL
open science

Caractérisation sans contact du coefficient de dilatation thermique de métaux par approche RF

Florian Requena, Nicolas Barbot, Darine Kaddour, Etienne Perret

► To cite this version:

Florian Requena, Nicolas Barbot, Darine Kaddour, Etienne Perret. Caractérisation sans contact du coefficient de dilatation thermique de métaux par approche RF. XXIIèmes Journées Nationales Microondes, Jun 2022, Limoges, France. hal-04775692

HAL Id: hal-04775692

<https://hal.science/hal-04775692v1>

Submitted on 10 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.

Caractérisation sans contact du coefficient de dilatation thermique de métaux par approche RF

Florian Requena, Nicolas Barbot, Darine Kaddour, Etienne Perret

Université Grenoble Alpes, Grenoble INP, LCIS, F-26000 Valence, France.
florian.requena@lcis.grenoble-inp.fr

Résumé — Dans cet article, une nouvelle méthode pour caractériser la dilatation thermique de métaux en utilisant une approche radio-fréquence est introduite. Cette méthode sans fil permet d'extraire le coefficient de dilatation thermique du matériau sans avoir besoin d'aucune calibration. Deux antennes, un VNA et un résonateur fabriqué avec le matériau à mesurer sont nécessaires. Les mesures ont été réalisées en utilisant une chambre climatique équipée d'absorbants. Les coefficients de dilatation thermique extraits sont en bon accord avec les valeurs fournies par le fabricant.

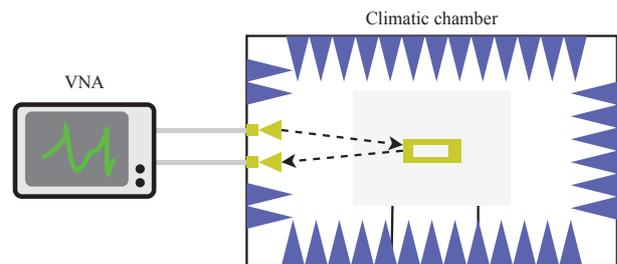


FIGURE 1. Principe de la mesure de la fréquence de résonance utilisée pour extraire le CTE.

1. Introduction

Le coefficient de dilatation thermique (en anglais CTE pour Coefficient of Thermal Expansion) est un paramètre crucial pour certaines applications comme dans le génie civil ou dans l'industrie des semi-conducteurs. De nombreuses approches très différentes les unes des autres ont été publiées dans la littérature pour le mesurer. Ainsi, des approches mécaniques tels que les dilatomètres où une tige du matériau à tester se dilate et transfère son élongation à un manomètre mesurant ce déplacement ont été publiées. Cette méthode est largement utilisée, cependant l'un des principaux inconvénients de ce banc vient du fait que le matériau testé est en contact direct avec le banc. Ainsi par transfert thermique, le banc de mesure se dilate créant ainsi des erreurs sur la mesure. Des matériaux spécifiques sont donc nécessaires pour fabriquer le banc d'essai. C'est pourquoi des méthodes sans contact ont été ensuite développées (interférométrie, imagerie optique, diffraction de rayons X, ... [1]). Les inconvénients de ces méthodes sont le coût du banc de mesure, la nécessité d'une précision d'alignement optique ainsi qu'un contrôle strict de l'environnement (l'utilisation de chambre sous vide pour contrer l'effet de l'indice de réfraction de l'atmosphère sur la longueur d'onde du laser, le contrôle strict de la longueur d'onde du laser en émission, ...). De multiples bancs de mesure du CTE existent et sont répertoriés dans [1].

D'après l'état de l'art, chaque approche présente des avantages et des inconvénients en fonction de nombreux facteurs tels que l'incertitude de mesure, la taille ou la forme des échantillons à mesurer, la plage de température requise... Le tableau I présente la synthèse des avantages

et inconvénients généraux de certaines approches.

Il convient également de noter que toutes ces différentes approches expérimentales nécessitent des bancs d'essai dédiés et optimisés qui ne sont généralement pas disponibles dans le commerce ou difficilement accessibles aux non-experts. Pour toutes ces raisons, une approche simple à mettre en œuvre pour la mesure du CTE serait d'un grand intérêt. Contrairement à la plupart des techniques existantes, celle présentée ici ne nécessite aucun étalonnage ni échantillon de référence. Elle est basée sur un modèle analytique très simple, relativement facile à mettre en œuvre en pratique. En effet, le banc est composé d'équipements RF disponibles dans le commerce. Ce nouveau banc d'essai peut ainsi être facilement reproduit par tout expert dans le domaine de la RF afin de mesurer le CTE d'un matériau.

Malgré le très grand nombre de bancs de mesure développés pour la mesure du CTE, à notre connaissance, aucun n'est basé sur un principe RF. Pourtant, il y a plusieurs années, il a été démontré qu'en envoyant une onde électromagnétique vers une cible radar spécifique et en mesurant son champ rétrodiffusé, plusieurs grandeurs physiques peuvent être détectées (voir Fig. 1) comme par exemple la mesure du déplacement de la cible de l'ordre de 100 μm à une fréquence de quelques GHz (typiquement entre 3 et 6 GHz) [2], pression [3], ou encore de permittivité [4]. La proximité entre le domaine RF et le domaine thermique a également déjà été mise à profit pour développer des capteurs de température RF en utilisant, par exemple, la dépendance de la permittivité à la température [5] ou la dilatation d'une structure 3D [6].

TABEAU 1. Avantages et inconvénients de méthodes existantes

	Mécanique (dilatomètre)	Optique (microscope)	Optique (interférence)	Rayons X	Ce papier
Erreur sur le CTE	4% [7]	6% [8]	<1% [9]	6% [10]	6%*
Compatibilité des matériaux	Très bonne	Bonne	Bonne	Cristaux seulement	Métaux seulement
Méthode sans contact	Non	Oui	Dépend	Oui	Oui
Alignement du banc de mesure	Pas nécessaire	Nécessaire	Nécessaire	Nécessaire	Pas nécessaire
Préparation des échantillons	Minimal	-	Dépend	Élevé	Moyen
Prix de l'équipement	Faible	Moyen	Élevé	Élevé	Moyen

* Une erreur inférieure à 1% est obtenue pour du zinc et du cuivre. L'erreur de 6% est obtenue pour le nickel.

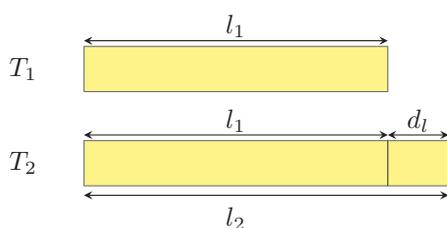


FIGURE 2. Dilatation d'un objet due à une variation de température.

2. Dilatation thermique

La dilatation thermique d'un matériau (voir Fig. 2) est définie comme la modification de son volume suite à une variation de température à pression constante. Si l'on considère un objet de longueur l_1 à la température T_1 , cet objet va se dilater avec l'augmentation de la température, et la longueur finale à une température $T_2 > T_1$ est donnée par :

$$l_2 = l_1(1 + \alpha(T_2 - T_1)) = l_1(1 + \alpha\Delta T) \quad (1)$$

où α est le CTE du matériau [1]. On note pour la suite que chaque grandeur physique avec l'indice 1 (respectivement 2) est considérée à la température T_1 (respectivement T_2). Le principe de mesure basé sur une mesure radio-fréquence est illustré sur la Fig. 3. Lorsqu'une boucle est illuminée par un champ électromagnétique incident, l'énergie maximale rétro-diffusée par le résonateur à une température $T_2 > T_1$ se produit à sa fréquence de résonance f_2 définie par [11] :

$$f_2 = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_{eff}}L_2} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_{eff}}L_1(1 + \beta\Delta T)} \quad (2)$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide, ε_{eff} est la permittivité effective vue par la boucle, L est la longueur effective du résonateur (longueur physique à laquelle s'ajoute une longueur additionnelle liée au champ frangeant présent au niveau des deux extrémités de la boucle) [11]. β est le coefficient de dilatation effectif pour L . Pour une boucle dont les dimensions ont été optimisées pour avoir le meilleur facteur de qualité possible à

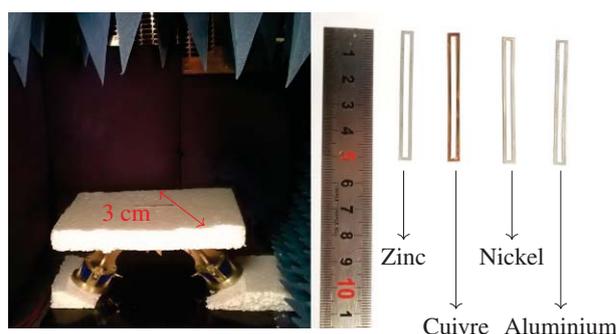


FIGURE 3. a) Installation à l'intérieur de la chambre climatique. b) Résonateurs boucle fabriqués avec différents métaux.

la fréquence de résonance de 3 GHz, (voir Fig. 4), on peut montrer que β suit la relation [11] :

$$\beta = 1.01\alpha \quad (3)$$

La valeur de β peut donc être estimée en mesurant les fréquences de résonances (f_1, f_2) à différentes températures (T_1, T_2 respectivement) avec :

$$f_2 - f_1 = \Delta f \simeq f_1\beta(T_2 - T_1) \quad (4)$$

Ensuite le CTE (α) s'extrait avec (3). On note que cette méthode permet d'extraire le CTE avec une bonne précision sans connaissance préalable de la longueur L ou de la permittivité effective ε_{eff} vue par le résonateur. Le résonateur boucle est utilisé dans cette mesure car tout en étant planaire et sans plan de masse, il présente un bon facteur de qualité permettant une très bonne estimation de la fréquence de résonance.

3. Mesures et résultats

Le banc de mesure et les résonateurs fabriqués et utilisés pour l'étude sont illustrés sur la Fig. 3. Différents métaux avec des puretés >99% ont été choisis. Les dimensions des résonateurs sont données dans la Fig. 4. La chambre climatique VC0018 de Votsch est utilisée pour contrôler la température. Des absorbants sont placés à l'intérieur de la chambre pour réduire le niveau de réflexion.

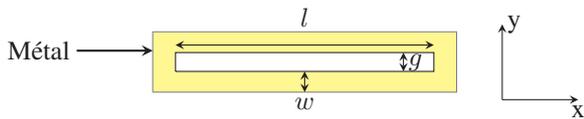


FIGURE 4. Dimensions nominales de la boucle fabriquée : $l = 50.83\text{mm}$, $g=2.07\text{mm}$ et $w=1.43\text{mm}$.

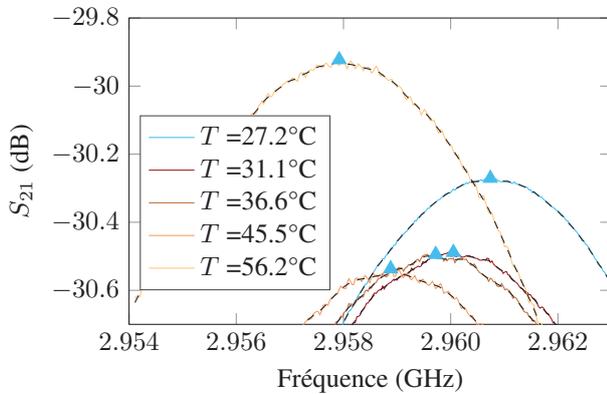


FIGURE 5. Paramètres S_{21} mesurés (ligne continue) et lissés (en pointillés) pour le résonateur en zinc.

Une configuration d'antenne bi-statique est utilisée pour augmenter l'isolation. Le protocole de mesure est le suivant : la température de la chambre climatique est d'abord réglée. Lorsque la température est stabilisée, le paramètre S_{21} est mesuré à l'aide du VNA. La mesure de température est ensuite faite à l'aide d'une caméra thermique (caméra thermique infrarouge TC-1). Les paramètres S ont été lissés afin de supprimer tout bruit résiduel de mesure qui pourrait impacter la recherche du maximum comme illustré sur la Fig. 5.

Le résonateur à boucle en zinc a été mesuré pour plusieurs températures allant de $27,2^\circ\text{C}$ à $56,2^\circ\text{C}$. Les paramètres S_{21} mesurés sont représentés sur la Fig. 5.

Comme le montre la Fig. 6, les simulations et les mesures des fréquences de résonance sont en bon accord pour la gamme de température considérée. Une erreur maximale de 0.3 MHz peut être observée à $31,1^\circ\text{C}$. A l'exception de cette température, les fréquences de résonance mesurées (Fig. 7) tendent vers une évolution linéaire comme obtenue en simulation et indiquée par (4).

La Fig. 7 présente les variations fréquentielles Δf pour les différents métaux en fonction de la température. Comme décrit par (4), dans cette représentation, la pente est égale à $f_1\beta$. Ensuite la relation (3) est appliquée pour déterminer α et les résultats sont affichés dans le tableau 2.

Les valeurs mesurées sont en accord avec les données fournisseur avec une erreur maximale de 6% pour le nickel. L'aluminium reçu provient d'un second fournisseur dont la pureté est moins maîtrisée ainsi un intervalle de valeurs sur le CTE est donné. On remarque aussi que plus le CTE est faible, plus les erreurs sont importantes. En effet, plus la dilatation physique est faible, plus il est difficile de mesurer ces variations est donc d'estimer avec confiance

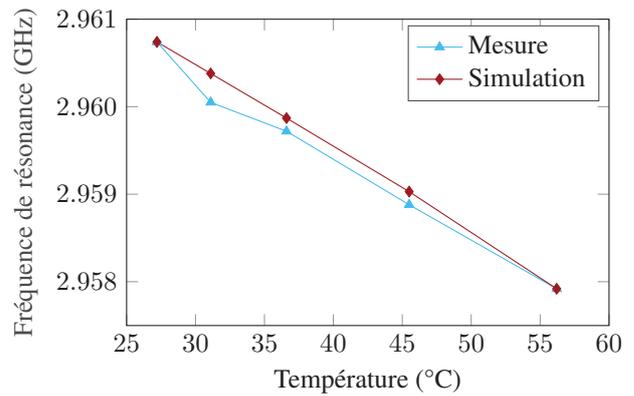


FIGURE 6. Extraction des fréquences de résonance lissées et simulées d'un résonateur boucle en zinc.

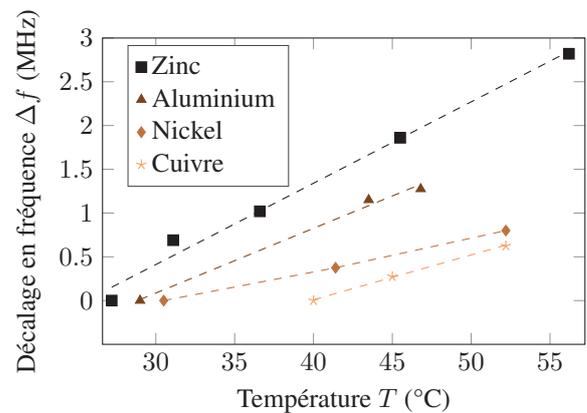


FIGURE 7. Décalage de la fréquence de résonance mesurée en fonction de la température pour les différents métaux.

α que ce soit avec cette approche comme pour les autres.

La relation entre l'élongation mesurée de la longueur de la boucle Δl due à une augmentation de la température est tracée dans la Fig. 8. Il est intéressant de noter que l'on peut voir ici que l'approche est suffisamment précise pour mesurer une variation de dimension de $\Delta l = 3,6\ \mu\text{m}$. Ceci est observable pour l'aluminium entre 43°C et 46°C . La Fig. 8 montre ainsi la grande sensibilité de l'approche proposée à la variation de longueur. Ceci permet d'extraire avec une grande précision le CTE de différents métaux. On note également que la limite de l'approche en ce qui concerne la plage de température de mesure est liée à la validité de l'équation (1). Ce domaine de validité est lié aux matériaux à caractériser, toutefois pour les métaux, (1) reste valable sur une plage de plusieurs centaines de degrés celsius. Il est également possible d'appliquer cette approche pour mesurer des températures négatives.

4. Conclusion

Dans cet article, une nouvelle méthode basée sur une approche sans contact radio-fréquence pour extraire le CTE de métaux est présentée. Des boucles réalisées à partir de différents métaux ont été utilisées. Les valeurs ex-

TABLEAU 2. Comparaison du CTE (α) mesuré en RF et fourni par le fournisseur.

Métal	CTE ($\times 10^{-6} \text{°C}^{-1}$)		Différence en %
	Fournisseur	avec (4)	
Zinc	31.0	31.03	0.09
Cuivre	17.0	16.96	0.2
Nickel	13.3	12.43	6
Aluminium	22-25	22.1	-

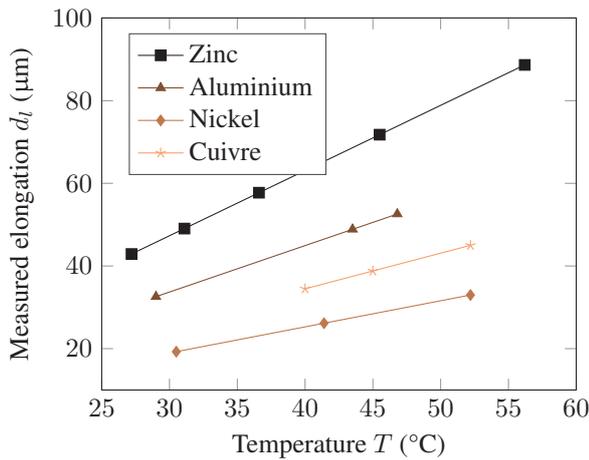


FIGURE 8. Élongation du résonateur mesurée en fonction de la température pour les différents métaux. L'élongation mesurée est calculée à l'aide du β estimé de la Fig. 7.

traies pour le coefficient d'expansion thermique sont en bon accord avec les valeurs fournies par le fabricant, soulignant ainsi le potentiel de l'approche de mesure pour la caractérisation du coefficient de dilatation thermique.

5. Remerciements

Ce projet a été financé par le Conseil européen de la recherche (ERC) dans le cadre du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne (convention de subvention n° 772539 ScattererID). Ce travail est également soutenu par l'Université Grenoble Alpes.

Références

- [1] J. James *et al.*, "A review of measurement techniques for the thermal expansion coefficient of metals and alloys at elevated temperatures," *Measurement science and technology*, vol. 12, no. 3, p. R1, 2001.
- [2] E. Perret, "Displacement sensor based on radar cross-polarization measurements," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 65, no. 3, pp. 955–966, 2017.
- [3] T. T. Thai *et al.*, "Novel design of a highly sensitive RF strain transducer for passive and remote sensing in two dimensions," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 3, pp. 1385–1396, 2013.
- [4] F. Costa *et al.*, "A depolarizing chipless RF label for dielectric permittivity sensing," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 28, no. 5, pp. 371–373, 2018.
- [5] E. M. Amin and N. Karmakar, "Development of a chipless RFID temperature sensor using cascaded spiral resonators," in *IEEE SENSORS 2011*, 2011, pp. 554–557.
- [6] T. T. Thai *et al.*, "Design and development of a millimetre-wave novel passive ultrasensitive temperature transducer for remote sensing and identification," in *the 40th European Microwave Conference*, 2010, pp. 45–48.
- [7] J. Valentich, "A vitreous silica tube dilatometer for the measurement of thermal expansion of solids from-195 to 1000°C," *Journal of Materials Science*, vol. 14, no. 2, pp. 371–378, 1979.
- [8] R. Montanini and F. Freni, "Non-contact measurement of linear thermal expansion coefficients of solid materials by infrared image correlation," *Measurement Science and Technology*, vol. 25, no. 1, p. 015013, 2013.
- [9] M. Okaji and H. Imai, "A practical measurement system for the accurate determination of linear thermal expansion coefficients," *Journal of Physics E : Scientific Instruments*, vol. 17, no. 8, p. 669, 1984.
- [10] T. R. Touloukian YS, Kirby RK and D. PD, *Thermophysical Properties of Matter, Volume 12—Thermal Expansion, Metallic Elements and Alloys*. New York : IFI-Plenum, 1975.
- [11] F. Requena *et al.*, "Contactless characterization of metals' thermal expansion coefficient by a free-space rf measurement," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 2, pp. 1230–1234, 2020.