

Le rayonnement thermique : moyen d'investigation de l'état physique du matériau au cours de sollicitations thermiques ou mécaniques

Yingshan ZHU, Wei-Wei DU, Julie CEDELLE*, Danièle WAGNER, Philippe HERVE

Laboratoire d'Energétique, Mécanique et d'Electromagnétisme (LEME)

Université Paris Ouest Nanterre La Défense

50 rue de Sèvres – 92410 Ville d'Avray

*(auteur correspondant : julie.cedelle@u-paris10.fr)

Résumé - Différents types de sollicitations extérieures, thermiques ou mécaniques peuvent induire des changements d'état ou de structures qui modifient alors directement les propriétés optiques d'un matériau (émissivité, indice complexe...). Ce papier présente différentes études visant à caractériser l'état physique des matériaux à partir de leurs propriétés thermo-optiques, c'est-à-dire par l'analyse du rayonnement qu'ils émettent, réfléchissent ou absorbent. Plusieurs exemples sont présentés.

Nomenclature

$L_{\lambda,T}$	luminance monochromatique à la température T, $W/m^3.sr$	<i>Symboles grec</i>
		ε émissivité
$L^o_{\lambda,T}$	luminance monochromatique du corps noir à la température T, $W/m^3.sr$	λ longueur d'onde, μm
T	température, K	<i>Indices et exposants</i>
v_d	vitesse de déformation, s^{-1}	UV ultraviolet
ΔL	allongement de l'éprouvette, m	IR infrarouge
L_0	longueur initiale de l'éprouvette, m	l luminance

1. Introduction

De façon générale, pour une même substance solide ou liquide, on peut rencontrer plusieurs arrangements distincts des atomes, des molécules qui leur sont associés, et qui vont correspondre à des propriétés différentes (optiques, mécaniques...) du matériau solide ou liquide [1]. D'autre part, tout corps porté à une certaine température émet un rayonnement dont la nature (intensité, spectre) dépend de la température mais aussi des propriétés intrinsèques du matériau. La grandeur qui caractérise le rayonnement est la luminance avec :

$$L_{\lambda,T,\varepsilon} = \varepsilon_{\lambda,T} L^o_{\lambda,T} \quad (1)$$

$L^o_{\lambda,T}$, la luminance du corps idéal appelé corps noir est décrite par la loi de Planck et ε est l'émissivité ou facteur d'émission qui est caractéristique du matériau. Le rayonnement d'un corps dépend de nombreux paramètres et en particulier de l'indice de réfraction complexe [2], de l'état physique, de la structure cristalline, etc.. du matériau. En général ce facteur est inconnu. En effet, le rayonnement d'un corps est créé par les oscillations de ses atomes et de ses molécules (phonons). La distribution relative des atomes ou des molécules joue un rôle essentiel sur l'émissivité. En effet, pour une même température, les différentes allotropies d'un corps et les différents états physiques le font se comporter comme si on avait plusieurs corps différents du point de vue du rayonnement.

Le rayonnement thermique émis par un matériau peut donc être considéré comme la signature de la structure même du matériau. Ainsi, toute modification de l'état physique d'un matériau initiée par une sollicitation extérieure, de nature thermique ou mécanique, peut être détectée par une mesure de rayonnement ou du facteur d'émission.

Les études présentées ici utilisent différentes techniques de mesure du facteur d'émission:

- la thermographie infrarouge (IR) utilisée seule, ou associée à la thermographie dans l'ultraviolet (UV) [3].
- la mesure optique directe de l'émissivité normale calculée sur la gamme spectrale (1-5,5µm) réalisée sous enceinte au laboratoire.

2. Changements de phase solide – liquide

L'étude présentée concerne un changement de phase liquide-solide sur un échantillon de fer pur, repéré par la mesure simultanée de la température et d'une variation nette du facteur d'émission.

2.1. Principe de la mesure simultanée de la température dans l'ultraviolet (UV) et de l'émissivité dans l'infrarouge (IR)

La luminance décrite par la loi de Planck est très sensible à la température aux courtes longueurs d'onde et surtout sensible à l'émissivité aux grandes longueurs d'onde [4]. Le principe de la mesure consiste à séparer les deux paramètres habituellement liés dans les mesures usuelles par pyrométrie ou thermographie : la température vraie est déterminée à la plus courte longueur d'onde (UV), et l'émissivité dans l'IR .

Pour les courtes longueurs d'onde, l'approximation de Wien permet d'obtenir une formule simplifiant l'expression de l'erreur sur la température.

$$L(\lambda, T) \approx \varepsilon \cdot C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-C_2 / \lambda T} \quad (2)$$

avec C_1 et C_2 constantes.

La relation entre la température vraie T et la température de luminance T_1 (température obtenue avec une émissivité supposée de 1) est:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_1} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \varepsilon \quad (3)$$

Cette relation montre que T_1 est inférieure à la température vraie T .

L'erreur relative sur la température sera d'autant plus faible que la mesure sera réalisée à courte longueur d'onde, si possible dans l'UV, pour ne pas être gêné par la lumière ambiante.

$$\frac{\Delta T}{T} \approx \lambda \cdot \frac{T}{C_2} \cdot \frac{\Delta \varepsilon_{UV}}{\varepsilon_{UV}} \quad (4)$$

L'erreur sur la température est :

$$\Delta T \approx \frac{\lambda T^2}{14388} \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \quad (5)$$

Il est possible d'exprimer l'erreur sur le calcul de l'émissivité dans l'IR.

$$\frac{\Delta \varepsilon_{IR}}{\varepsilon_{IR}} = \frac{\lambda_{UV}}{\lambda_{IR}} \cdot \frac{e^{\frac{c_2}{\lambda_{IR} T}}}{e^{\frac{c_2}{\lambda_{IR} T}} - 1} \cdot \frac{\Delta \varepsilon_{UV}}{\varepsilon_{UV}} \approx \frac{\lambda_{UV}}{\lambda_{IR}} \cdot \frac{\Delta \varepsilon_{UV}}{\varepsilon_{UV}} \quad (6)$$

En supposant que $\varepsilon_{UV} = 0,5$ (pour un métal) dans l'équation (6), et même en faisant une erreur grossière dans l'UV, par exemple $\frac{\Delta \varepsilon_{UV}}{\varepsilon_{UV}} \pm 50\%$, nous obtiendrons $\Delta T = 30$ K pour

$$T=1700\text{K et } \frac{\Delta \varepsilon_{IR}}{\varepsilon_{IR}} < 5\%.$$

2.2. Approche expérimentale

La technique expérimentale utilisée permet de cartographier les champs de température et d'émissivité de la zone à analyser. Le dispositif expérimental (figure 1) est composé de deux caméras et d'un dispositif optique composé de filtres (0,33 μm et 4,0 μm) et de miroirs permettant d'observer une même zone de diamètre 1,5 cm sur un échantillon de fer pur (ARMCO). Le chauffage de cet échantillon est réalisé grâce à un four à induction (P = 2,5 KW) avec un flux continu d'argon pour limiter l'oxydation en surface.

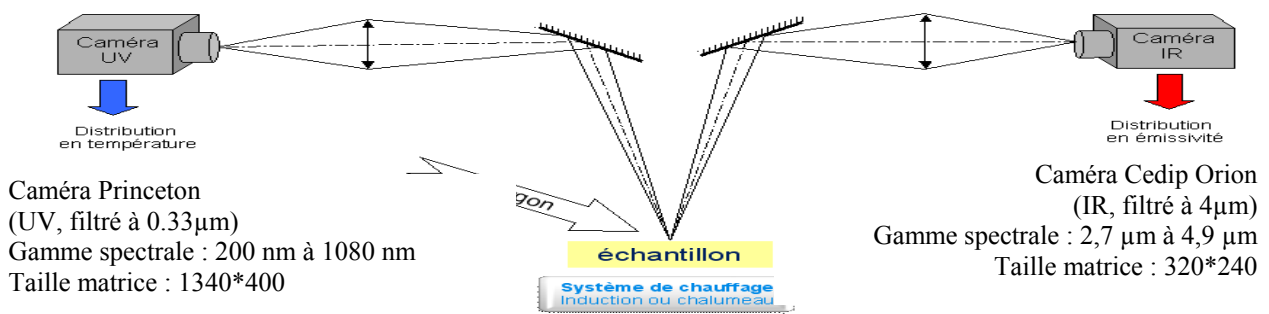
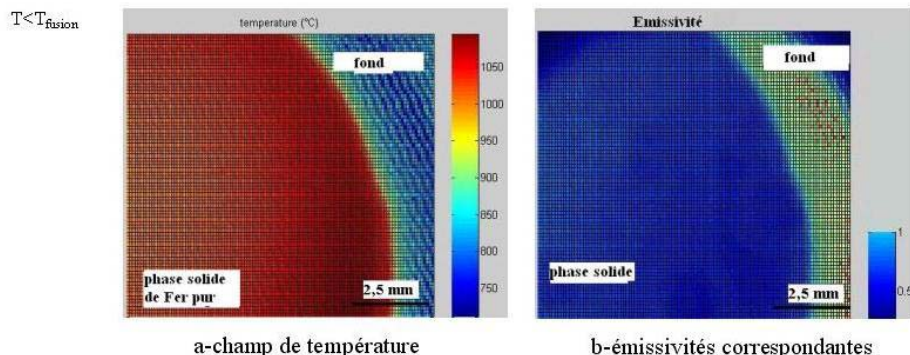


Figure 1 : schéma du dispositif expérimental

2.3. Résultats

La température et l'émissivité sont calculées simultanément point par point et l'acquisition d'images successives permet également de suivre l'évolution des deux paramètres en fonction du temps [5]. Deux exemples d'acquisition sont présentés : avant fusion (figure 2a et 2b) en phase solide et pour une température légèrement supérieure à la température de fusion (figure 2c et 2d) permettant ainsi d'obtenir des petites zones liquides.



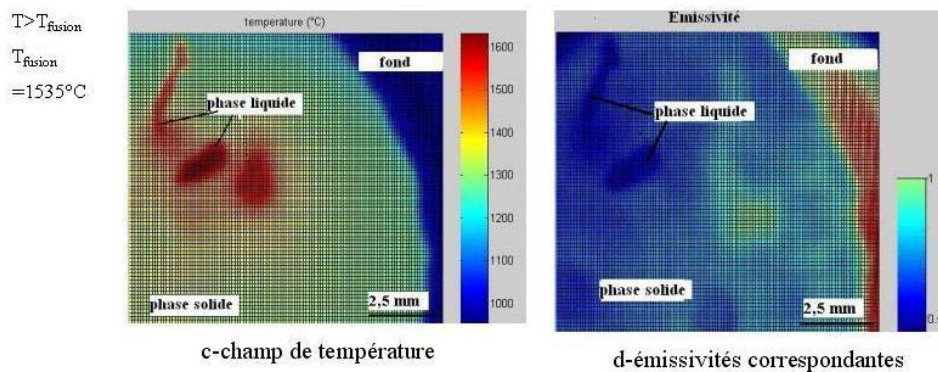


Figure 2 : détermination simultanée des champs de température et d'émissivité pour un échantillon de fer pur chauffé par induction

On remarque que la cartographie en émissivité (résolution supérieure à 0,5 mm) donne sans ambiguïté la nature des phases (liquide ou solide) du matériau. Les zones oxydées (figure 2d) sont caractérisées par de fortes valeurs d'émissivité.

3. Changements de phase solide-solide

Les matériaux étudiés dans ce paragraphe, concernent les changements de phase solide-solide obtenus par sollicitation mécanique dans un métal (transformation martensitique dans un acier inoxydable austénitique 304L) et dans un diélectrique (cristallisation du caoutchouc naturel) .

3.1. Acier inoxydable 304 L

L'acier inoxydable 304 L (X2 CrNi 18-10) est un matériau de structure cubique à faces centrées (cfc) appelée phase austénitique, très utilisé dans l'industrie pour son excellente résistance à la corrosion, sa grande ductilité et sa bonne formabilité. Son principal inconvénient est son éventuelle instabilité métallurgique [6] occasionnant une variation de volume et de propriétés mécaniques. Sous l'effet d'une déformation plastique, l'austénite peut se transformer en martensite (quadratique centrée). La quantité de martensite formée est fonction d'un certain nombre de paramètres dont le taux de déformation, le type de sollicitation et la vitesse de déformation.

Dans le cadre d'une étude sur le comportement de l'acier 304L en forgeage à grande vitesse, des essais de compression statique et dynamique (essais sur barres d'Hopkinson) à différentes vitesses ont été réalisés [7-8]. L'observation de la microstructure des échantillons testés a montré l'apparition de bandes dont l'analyse par un système d'imagerie en diffraction d'électrons rétrodiffusés couplé à un microscope électronique à balayage (plus connu sous le nom d'EBSD pour Electron BackScatter Diffraction) a révélé la structure quadratique centrée de la phase martensite (figure 3).

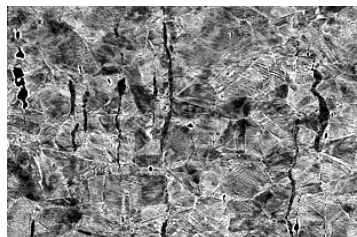


Figure 3 : Image MEB de bandes de martensite transformée sur matrice austénitique (304L, $v_d=1200 \text{ s}^{-1}$)

Des essais ont alors été effectués à différentes vitesses de déformation et arrêtés pour le même taux de déformation (tableau 1). Pour chaque échantillon, une analyse EBSD a permis de quantifier le taux de martensite formé (tableau 1). De plus, un échantillon a été plongé dans l'hélium liquide de façon à obtenir un échantillon entièrement martensitique.

Vitesse de déformation	Taux de déformation	Taux de martensite	ε à 40°C	ε à 70°C
$v_d=10^{-3} \text{ s}^{-1}$ + immersion dans l'hélium liquide	0.41	100%	0.167	0.178
$v_d=1200 \text{ s}^{-1}$	0.41	1.32%	0.155	0.166

Tableau 1 : Evolution de la fraction de martensite des échantillons étudiés

La mesure du facteur d'émission ε a été réalisée à différentes températures à l'aide du banc de mesure du laboratoire [7]. Malgré une faible variation de ε , on constate que le facteur d'émission augmente avec le taux de martensite formé (environ 10% dans les cas présentés). Ceci montre que le facteur d'émission est en relation avec l'arrangement cristallin des phases. La mesure de ce facteur peut donc permettre de suivre l'évolution des changements de phase.

3.2. Cristallisation sous sollicitation monotone du caoutchouc naturel

Après fabrication, le caoutchouc naturel vulcanisé et renforcé par du noir de carbone est amorphe. La cristallisation (orientation préférentielle des chaînes macromoléculaires) peut être induite ou favorisée soit à l'état fondu, soit à l'état solide par un étirage uniaxial.

Pour caractériser la cristallisation, des essais de traction sur des éprouvettes en caoutchouc naturel ont été effectués. Au cours de ces quatre essais, la mesure du rayonnement thermique (luminance) en surface des éprouvettes a été faite, par la caméra IR Cedip (utilisée sur toute sa gamme spectrale).

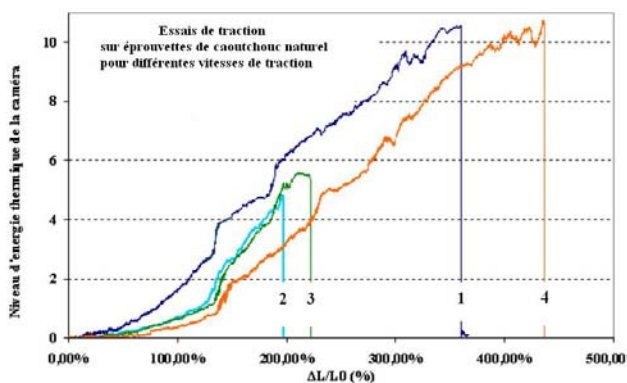


Figure 4 : évolution de la luminance en surface pour le caoutchouc naturel au cours d'un essai de traction.

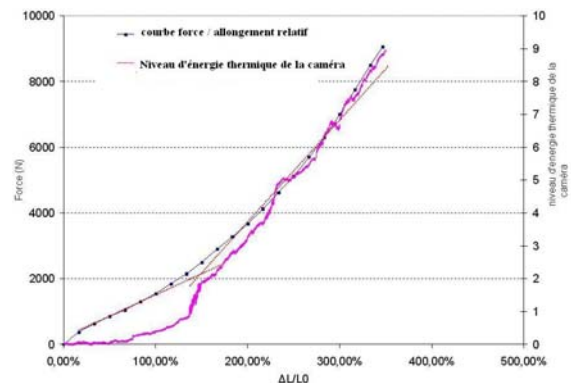


Figure 5 : courbe force-allongement relatif pour un essai de traction sur une éprouvette de caoutchouc naturel.

La figure 4 montre pour les 4 essais un saut supérieur à 30% de la luminance au cours de la sollicitation. Pour tous les essais, on constate que ce saut a lieu aux environs de 130% d'allongement relatif. L'enregistrement des courbes force-allongement (figure 5) montre une variation de rigidité pour un niveau d'allongement comparable, ce qui montre qu'un changement de structure (cristallisation) se caractérise par une variation de luminance.

Une étude plus précise cherchant à relier directement l'émissivité à ce changement de structure est actuellement en cours au laboratoire en utilisant la technique décrite dans le paragraphe 2-1.

4. Conclusion

Les résultats montrent que les mesures de rayonnement thermique, et plus particulièrement du facteur d'émission permettent de repérer par voie optique des changements phases. Dans un contexte industriel où les métallurgistes demandent des techniques de plus en plus performantes pour analyser et contrôler les bains de fusion, suivre un processus de soudage, la technique expérimentale présentée, permet de cartographier les champs de température (avec une précision absolue de l'ordre de 2%) et d'émissivité (précision supérieure à 5%) de la zone à analyser et de repérer avec précision les phases liquides et solides (en l'absence de gaz à hautes températures pouvant perturber la mesure). De nombreux industriels (industrie mécanique, automobile...) cherchent à également à caractériser leur matériau à l'état solide par des méthodes non intrusives et non destructives, au cours des procédés de fabrication ou au cours de la vie de la pièce (phénomène de vieillissement et fiabilité du matériau). Cette étude montre qu'il est également possible de suivre l'évolution des changements de phase à l'état solide pour les métaux et les diélectriques.

Références

- [1] P.Papon, J.Leblood, P.H.E Meyer, *Physique des transitions de phases*, Edition Dunod (1999)
- [2] P. Hervé, A. Sadou, Study of the thermo-optical parameters, emissivity; complex index; plasma frequency; relaxation frequency of metals and alloys, *Infrared Physics & Technology* 51,2008, pp 249–255.
- [3] P. Hervé, brevet, Procédé et pyrométrie ultraviolet pour mesurer, sans contact et à distance, la température de surface d'un corps. *Developed by LASUR society*. 1988.
- [4] V. Pina, N.Ranc D. Wagner, P. Herve, G. Gotter, S. Philippon, Etude des comportements statique et dynamique de matériaux métallique par pyrométrie visible ou infrarouge, *Photoniques*, (2004), n° 16, 42-45.
- [5] Y. Zhu, J. Cedelle, P Hervé. Simultaneous determination of surface temperature and emissivity: Application in the study of changes of phase. *22nd International Conference on Surface Modification Technologies*, 2008, Trollhätten, Sweden.
- [6] J.-C. Bavay, *Aciers inoxydables austénitiques dans les aciers inoxydables*, P. Lacombe, B. Brroux, G. Beranger Ed. Sc., Edition de la physique (1990).
- [7] C. Jovic, Influence de la vitesse de déformation en mise en forme à froid, *thèse Université Paris X soutenue* le 16 octobre 2007.
- [8] C. Jovic, D. Wagner, P. Herve, G. Gary, L. Lazarotto, Mechanical behaviour and temperature measurement during dynamic deformation on split Hopkinson bar of 304L stainless steel and 5754 aluminium alloy. *Jl Phys.* IV 134(2006)1279-1285