

# Caractérisation de marqueurs photoluminescents de l'histoire thermique

Stéphane AMIEL<sup>1\*</sup>, Etienne COPIN<sup>1</sup>, Thierry SENTENAC<sup>1</sup>, Yannick LE MAOULT<sup>1</sup>, Philippe LOURS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Toulouse; CNRS, Mines Albi, INSA, UPS, ISAE-SUPAERO ; ICA (Institut Clément Ader); Campus Jarlard, F-81013 Albi, France

\*(Auteur correspondant : stephane.amiel@mines-albi.fr)

**Résumé** -Les marqueurs photoluminescents sont une solution pour la mesure de température de surface et en profondeur de matériaux utilisés dans de nombreux secteurs industriels. Ces marqueurs grâce à l'évolution permanente des propriétés d'émission de fluorescence avec la température et la durée d'exposition constituent un indicateur de l'histoire thermique de ces matériaux. Ces évolutions doivent être caractérisées précisément pour construire les courbes d'étalonnage propres à chaque marqueur utilisé.

## 1. Introduction

La mesure de température reste un enjeu majeur dans de nombreux procédés industriels actuels tels que les énergies [1], l'aéronautique [2], la microélectronique [3] ou les nanosciences [4]. En effet, la mesure de l'évolution de la température de surface du composant dans un environnement hostile permet d'assurer aussi bien la compréhension de ses phénomènes physiques que sa sécurité en termes de limite admissible. Il existe de nombreuses techniques de mesure de température de surface non-intrusives telle que la thermographie infrarouge [5]. Toutefois ces méthodes de mesure et leurs dérivées ne permettent que l'accès à la température de surface simultanément à l'évolution du phénomène physique qui l'a provoqué. Dans un environnement sévère avec des températures élevées (> 1000°C) où les zones étudiées restent difficiles d'accès, de nouvelles méthodes de mesure non-intrusives et en différé doivent être développées. Celles-ci doivent être robustes et applicables dans des situations industrielles variées. Les peintures thermiques [6] ont été développées depuis plusieurs années pour déterminer l'historique des températures de surface du matériau revêtu. En effet, ces peintures subissent des changements de couleurs irréversibles en fonction de la température à laquelle le revêtement est exposé. La Figure 1 présente les changements de teinte observés sur une éprouvette revêtue de peinture thermique chauffée par effet Joule. Un courant électrique traverse la pièce et les variations de section créent ainsi un gradient thermique.

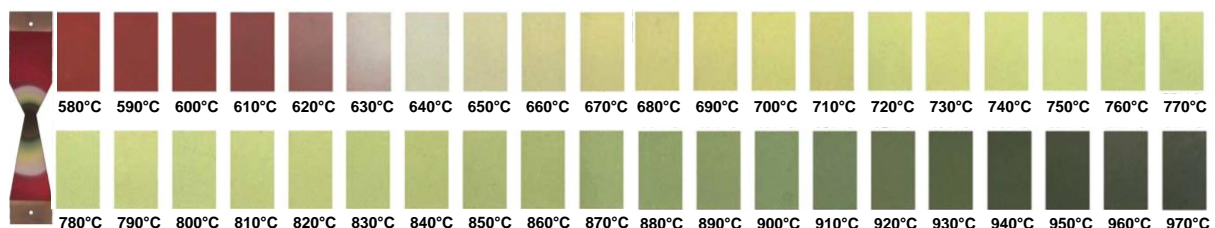


Figure 1 : Exemple d'éprouvette chauffée par effet Joule revêtue de peinture thermique et ensemble d'échantillons chauffés par pas de 10°C [6].

Toutefois le nombre limité de changements de teinte (virages) en fonction de la température et le caractère discret de la mesure (cf. Figure 1) conduisent à une résolution variable (d'une dizaine à une centaine de degrés).

Les marqueurs thermiques fluorescents peuvent aussi jouer le rôle d'indicateur de l'histoire thermique du matériau étudié [7]. Leurs propriétés d'émission subissent des modifications permanentes en fonction de la température subie par le marqueur ainsi que la durée d'exposition. L'analyse *a posteriori* des propriétés de fluorescence des marqueurs à température ambiante doit donc permettre de remonter à la température maximale « vue » par le marqueur au cours d'un traitement thermique antérieur en condition stationnaire.

Cet article se propose dans une première partie d'introduire le phénomène de fluorescence pour ensuite présenter plus précisément le concept de marqueurs de l'histoire thermique. La procédure de caractérisation de ces marqueurs thermiques est ensuite décrite à travers l'exemple de différents luminophores. Tout d'abord, le spectre d'excitation est déterminé pour identifier les longueurs d'ondes auxquelles exciter les échantillons pour obtenir l'intensité de fluorescence optimale du revêtement. La caractérisation optique se poursuit avec l'exploitation des spectres d'émission pour construire des ratios d'intensité de fluorescence à des longueurs d'onde judicieusement choisies. L'étude du temps caractéristique de décroissance temporelle de fluorescence à une longueur d'onde particulière d'émission est ensuite décrite. À partir d'échantillons préalablement chauffés, il est alors possible de construire des courbes d'étalonnage exprimant la température de chauffage en fonction de l'évolution spectrale et temporelle de la fluorescence. Ceci définit un cadre d'application de marqueur thermique pour un suivi de l'histoire thermique du matériau.

## **2. Thermométrie par fluorescence**

Le phénomène de fluorescence est décrit comme l'émission de lumière par un corps suite à l'absorption d'énergie sous forme de lumière (photons) par ce corps [8]. L'absorption d'un photon d'énergie adéquate fait passer un électron de l'état fondamental à un niveau vibrationnel sous forme d'un état « excité ». La relaxation se fait par le retour de l'électron au niveau fondamental, le seul état d'énergie stable, par différents mécanisme de transferts d'énergie radiatifs et non-radiatifs. La fluorescence correspond au transfert radiatif qui a lieu lorsque le transfert d'énergie est défavorable à une relaxation vibrationnelle (niveaux de transitions distants). Le transfert radiatif s'accompagne de l'émission d'un photon dont l'énergie et donc la longueur d'onde de chaque pic observé sur un spectre d'émission, correspondent à la différence d'énergie entre les deux niveaux de transition.

Les marqueurs fluorescents sont composés de matrices hôtes en matériaux isolants ou semi-conducteurs dopées avec de petites quantités d'activateurs luminescents. Les activateurs introduisent des niveaux d'énergie entre la bande de conduction et la bande de valence de la matrice. Grâce à cela, le matériau est capable d'absorber et de réémettre des photons UV-visibles par transitions radiatives. Deux familles d'activateurs sont identifiées : les ions métaux de transition et les ions lanthanides. L'intérêt des ions lanthanides est leur plus faible sensibilité aux champs cristallins de leur matrice hôte.

La température peut modifier les propriétés de fluorescence des luminophores à travers la variation de l'intensité des pics d'émission ou la durée de vie du phénomène de fluorescence.

## **3. Marqueurs de l'histoire thermique fluorescents**

Le concept de marqueur de l'histoire thermique photoluminescent repose sur la possibilité de déterminer la température « vue » par un luminophore lors d'un traitement thermique antérieur court (10-20 minutes) à partir de la mesure de ses propriétés de fluorescence. Si la température est suffisamment élevée et la durée d'exposition suffisamment importante, les évolutions physico-chimiques à l'échelle atomique subies par le matériau se répercutent en effet sur les probabilités de transitions électroniques radiatives, et donc sur ses propriétés d'émission de fluorescence spectrales (longueur d'onde, intensité) et temporelles (temps de

vie). À l'heure actuelle, trois mécanismes physico-chimiques thermo-activés principaux ont été identifiés comme exploitables pour la détermination de l'histoire thermique :

Les transformations de phase [9] affectent le champ cristallin et l'environnement de symétrie autour des ions activateurs. L'existence de plusieurs formes allotropiques hautes températures du luminophore  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2:\text{Mn}^{2+}$  génère ainsi une évolution permanente et significative de son spectre d'émission pour des traitements thermiques de 15 min dans la plage 600-1000°C, liée au changement de coordination des ions  $\text{Mn}^{2+}$  [9] (cf. Figure 2).

L'évolution du degré de cristallinité [7][10-12] provoque l'uniformisation de l'environnement local des ions activateurs et la réduction du nombre de défauts cristallins pouvant inhiber la fluorescence. La zircone partiellement stabilisée à l'yttrine (YSZ) dopée avec des ions erbium  $\text{Er}^{3+}$ , dans un état de cristallisation peu avancé après synthèse par voie sol-gel, voit ainsi l'intensité de ses pics d'émission principaux à 545 nm et 562 nm augmenter d'un facteur 55 après un traitement thermique de 15 min à 1150°C (cf. Figure 3).

Les changements du degré d'oxydation des ions activateurs [13-14]  $\text{Eu}^{2+}$  en ions  $\text{Eu}^{3+}$  dans la matrice  $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$ , lors de traitements thermiques courts, peut être suivie grâce au ratio des intensités d'émission propre à chacun des deux activateurs. Il est alors possible de marquer l'histoire thermique du matériau dans la plage 700-1100°C [13-14]. Ce mécanisme présente l'avantage dans certains cas d'être réversible si le matériau est à nouveau traité thermiquement en atmosphère réductrice [14].

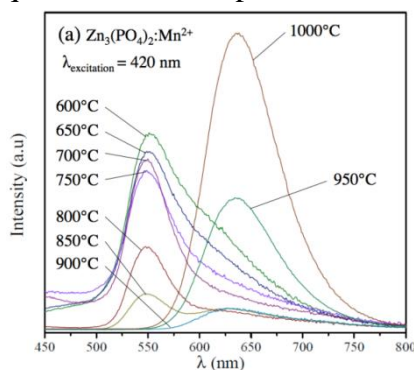


Figure 2 : Évolution des spectres d'émission à température ambiante du luminophore  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2:\text{Mn}^{2+}$  avec la température provoqué par des transformations de phases cristalline thermo-activés lors de traitements thermique de 15 min [9].

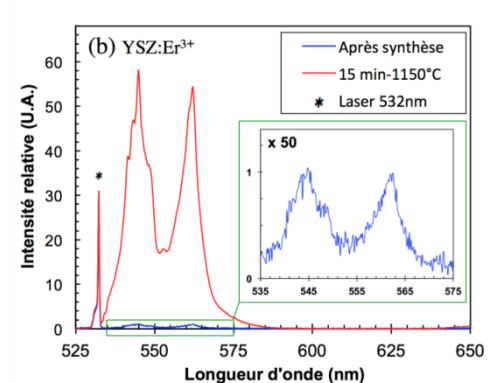


Figure 3 : Évolution des spectres d'émission à température ambiante du luminophore  $\text{YSZ}:\text{Er}^{3+}$  entre l'état partiellement cristallisé d'après synthèse par voie sol-gel et après un traitement thermique de 15 min à 1150°C.

Un étalonnage approprié des propriétés de fluorescence en fonction de la température pour des traitements thermiques isothermes courts de durée contrôlée permet alors de remonter à l'histoire thermique. Le caractère continu de l'évolution des paramètres de fluorescence, mesurables de manière quantitative et sans ambiguïté à l'aide d'équipements standards de spectroscopie et d'analyse de la fluorescence, permet un gain en résolution des mesures de température potentiellement très significatif par rapport aux changements de couleur discrets des pigments thermochromes classiques.

## 4. Caractérisation des propriétés spectrales en fonction de la température

### 4.1 Spectre d'excitation

L'objectif de la caractérisation spectrale est d'abord d'identifier les longueurs d'ondes d'excitation optimales du luminophore par la construction de son spectre d'excitation.

### 4.1.1 Mesure de spectre d'excitation

Le relevé des spectres d'excitation a été effectué avec un lecteur à balayage spectral multi-modes Varioskan. L'appareil permet de sélectionner la longueur d'onde d'émission avec un dispositif de deux monochromateurs en série (cf. Figure 4). Deux autres monochromateurs et une lampe flash au xénon permettent d'effectuer un balayage du signal d'excitation en longueur d'onde comprise entre 200-1000nm par pas de 1nm.

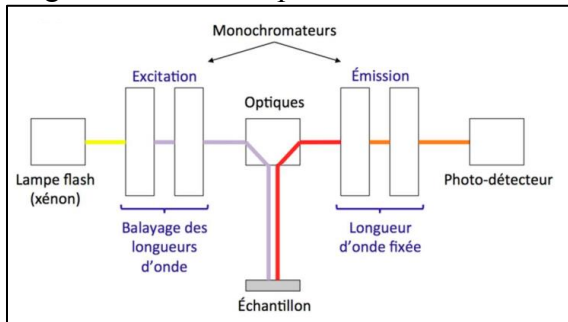


Figure 4 : Schéma de fonctionnement du lecteur à balayage spectral Varioskan

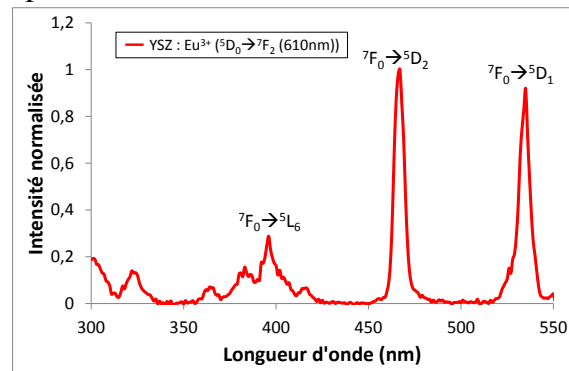


Figure 5 : Spectre d'excitation de l'émission à 610nm (transition  ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ ) pour YSZ:Eu<sup>3+</sup>.

La fluorescence émise par l'échantillon est mesurée sur une bande passante de 5nm par un photo-multiplieur positionné après le double monochromateur. Pour chaque longueur d'onde d'excitation, l'intensité d'émission est mesurée à une longueur d'onde fixée au préalable.

### 4.1.2 Résultats et discussions

La Figure 5 représente le spectre d'excitation obtenu pour un échantillon recouvert d'un revêtement à matrice zircone YSZ:Eu<sup>3+</sup> avec une longueur d'onde d'émission fixée à 610nm, correspondant à la transition électronique radiative  ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$  des ions Eu<sup>3+</sup>. Le spectre d'excitation présente 3 pics correspondant à autant de transition électronique. Pour étudier l'émission du marqueur à 610nm celui-ci doit être excité à la longueur d'onde de 390nm, 465nm ou 535nm. L'erbium Er<sup>3+</sup>, également utilisé comme dopant possède lui aussi un pic à 535nm. Pour la caractérisation des différents luminophores, le choix s'est porté sur une source excitatrice proche de la longueur d'onde de 535nm.

## 4.2 Spectre d'émission

Précédemment, il a été montré que l'intensité de la fluorescence dépendait de la température « vue » par le luminophore au cours du traitement thermique. L'étude d'échantillons ayant subi des traitements thermiques à différente température doit permettre de construire des courbes d'étalonnage. Ces courbes seront par la suite utilisées pour réaliser des mesures de l'histoire thermique de matériaux. Les temps de traitement thermique auxquels sont soumis les échantillons, sont choisis pour être représentatifs de l'environnement dans lequel les luminophores seront par la suite utilisés.

### 4.2.1 Banc expérimental

Le montage expérimental présenté sur la Figure 6 permet de réaliser des mesures d'intensité et de temps de vie de fluorescence. Ce montage se compose d'un laser continu de type Nd:YAG de longueur d'onde 532 nm d'une puissance de 1.07 W et avec un diamètre de 1.2 mm. Cette longueur d'onde permet d'exciter l'euporium et l'erbium. Dans le cadre de mesure de temps de vie, le laser est pulsé avec un modulateur acousto-optique (MAO). Le

faisceau laser est ainsi diffracté avec une répartition de l'énergie entre l'ordre 0 et l'ordre 1. Un diaphragme positionné à la suite du modulateur permet de ne conserver que l'ordre 1 et par conséquent d'obtenir une excitation pulsée. La fréquence et la durée d'impulsion sont contrôlées par un générateur de pulse dont le signal est transmis à un driver RF qui pilote le modulateur. Dans le cadre de la mesure d'intensité, un signal piloté par un générateur continu dédié contrôle le modulateur. La mesure du spectre d'intensité s'effectue au moyen d'un spectromètre USB 2000+ équipé d'une fibre optique pourvue d'une lentille de collection qui enregistre le spectre de fluorescence émis par l'échantillon étudié. La tête de la fibre est installée à 20 cm de la surface visée. Un filtre passe-haut avec une longueur d'onde de coupure à 535 nm est positionné devant la tête de la fibre afin de minimiser toute collection du faisceau laser réfléchi. Le spectromètre est privilégié par rapport au VARIOSKAN car il permet une mesure de spectre entre 400 et 700nm avec une résolution de 0.15 nm.

L'étude du temps de vie de fluorescence est réalisée à l'aide d'un photomultiplicateur silicium. Selon le luminophore étudié, un filtre passe-bande de largeur typique de 10 nm centré sur la longueur d'onde étudiée est positionné devant le photomultiplicateur. La décroissance temporelle du signal de fluorescence est ensuite enregistrée sur un oscilloscope semi-numérique commandé par un ordinateur. Le banc de mesure est installé dans une enceinte hermétique pour protéger l'utilisateur du rayonnement laser.

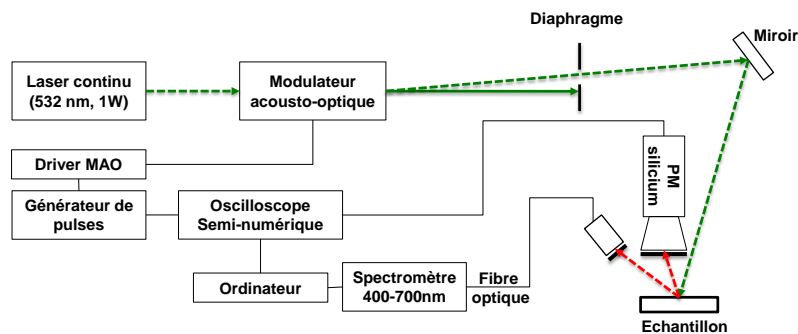


Figure 6 : Représentation du dispositif expérimental pour la mesure de spectre d'émission et la mesure de temps de vie de fluorescence.

#### 4.2.2 Mesures spectre d'émission et construction du rapport d'intensité en fonction de la température

Les spectres d'émission sont traités sous le logiciel Oceanview. Chaque spectre enregistré est une moyenne de 30 spectres acquis pour tenir compte des fluctuations du spectromètre et de l'énergie du laser. Quatre positions d'échantillons sont aussi étudiées en considérant les éventuelles inhomogénéités du nombre de centres photoluminescents excités.

La Figure 7 présente les spectres d'émission d'un luminophore étudié pour des échantillons soumis à des températures de traitement thermique comprises dans la gamme 1000°C-1200°C.

Pour mesurer l'intensité de fluorescence, le spectre est intégré sur une bande de 10 nm autour de la longueur d'onde centrale du pic étudié pour correspondre à la largeur des filtres qui sont couramment utilisés. Toutefois, l'intensité d'un pic dépend de nombreux facteurs expérimentaux tel que la source excitatrice, le luminophore excité mais aussi la géométrie du dispositif expérimental. La méthode pour s'affranchir de ces contraintes consiste à effectuer le rapport entre l'intensité d'un pic d'émission sensible à la température avec l'intensité d'un pic de référence dont l'amplitude varie très peu avec la température de traitement thermique. Cette méthode apparaît donc robuste vis-à-vis des conditions expérimentales dans le cas où les deux luminophores sont affectés de la même manière par celles-ci. Le rapport d'intensité correspond donc au rapport des intégrales de deux pics sur une largeur de 10 nm.

La Figure 8 présente l'évolution relative du rapport d'intensités de fluorescence avec la température de traitement thermique pour le luminophore étudié sur la Figure 7. Le pic de référence pour la construction du rapport est un pic du spectre d'émission rendu insensible à la variation de température de traitement thermique.

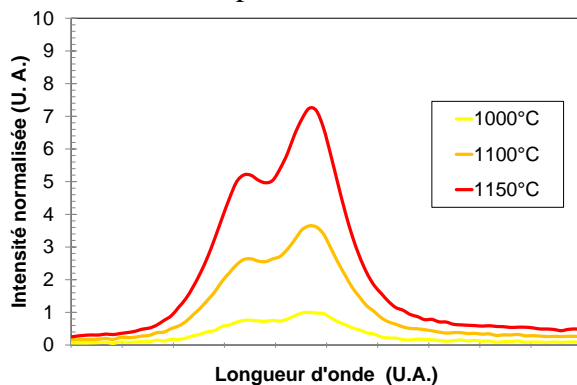


Figure 7 : Spectre d'émission normalisé du luminophore étudié pour les températures de traitement thermique de 1000, 1100 et 1150°C.

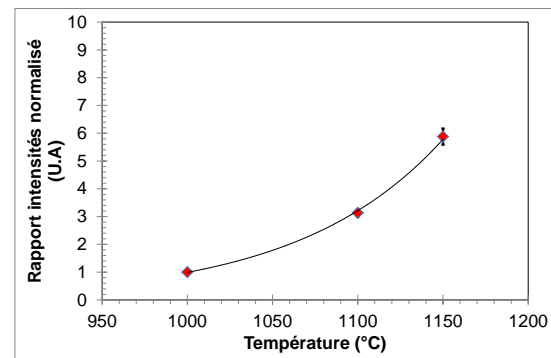


Figure 8 : Evolution du rapport d'intensité normalisé du luminophore étudié en fonction de la température de traitement thermique.

### 4.2.3 Résultats et discussions

La Figure 7 met en évidence une augmentation significative de l'intensité de fluorescence avec la température de traitement thermique avec une variation d'un facteur 6 entre 1000 et 1150°C. L'évolution du rapport de l'intensité de fluorescence avec la température de traitement thermique (cf. Figure 8) tient compte de l'incertitude sur les 30 spectres consécutifs moyennés et les quatre positions de l'échantillon. Un modèle exponentiel permet de décrire cette évolution en fonction de la température de traitement thermique. Le luminophore étudié convient pour des mesures thermiques sur des matériaux ayant été soumis à des températures dans la gamme 1000°C-1150°C. La détermination de la différence de température équivalente au bruit (DTEB) approchée à partir de ce modèle et des incertitudes de mesure s'exprime :

$$DTEB = \frac{\sigma_i}{S_{T_i}} \quad (1)$$

Avec  $S_{T_i}$  la sensibilité du luminophore autour de la température de traitement thermique  $T_i$ .  $\sigma_i$  représente l'incertitude calculée par une loi de propagation des incertitudes. Ainsi, pour la gamme de température comprise entre 1000°C et 1150°C, la résolution du luminophore pris en exemple s'établit entre 0.5°C et 3°C, soit une résolution très largement meilleure que celle des pigments thermochromes classiques de l'ordre de la dizaine de degrés au mieux. Le luminophore apparaît donc comme un candidat pertinent pour la mesure de température « vue » par un matériau dans la plage 1000-1150°C par la méthode des ratios d'intensités.

## 5. Étude du temps de vie de fluorescence en fonction de la température

L'étude du temps de vie de fluorescence permet aussi de déterminer la température « vue » par le marqueur. Bien que cette méthode reste plus compliquée à mettre en œuvre que l'étude des spectres d'émission, elle présente l'avantage d'être peu sensible aux conditions expérimentales (géométrie, etc...) par rapport à l'étude des intensités de fluorescence.

### 5.1 Banc expérimental

Le banc expérimental reprend le même dispositif que pour la construction des spectres d'émission. Le générateur qui pilote le modulateur acousto-optique permet d'obtenir des

impulsions lasers d'une durée de 200  $\mu\text{s}$  à une fréquence de 10 Hz. Ce réglage permet de travailler dans la plage de linéarité du photomultiplicateur utilisé pour mesurer l'évolution temporelle de la fluorescence. Le signal acquis sur l'oscilloscope semi-numérique, piloté par un ordinateur, est moyenné sur 64 signaux consécutifs pour améliorer le rapport signal sur bruit.

## 5.2 Détermination des temps de vie et construction des courbes d'étalonnages en fonction de la température

La décroissance temporelle de fluorescence suit une loi exponentielle dont le temps caractéristique dépend de la température. L'analyse des signaux mesurés consiste donc à déterminer ce temps de décroissance avec une régression par un modèle multi-exponentiel. En effet, certains luminophores présentent des extinctions de fluorescence sous la forme de somme de une à trois exponentielles :  $I(t) = A_1 \exp(-t/\tau_1) + \dots + A_n \exp(-t/\tau_n)$ .

Plusieurs méthodes ont été étudiées pour déterminer les paramètres des modèles multi-exponentiels [15]. La modélisation par la méthode des moindres carrés non-linéaires [16] (par l'algorithme de Levenberg-Marquardt [17-18]) et la méthode de Laplace-Padé [19] sont les deux méthodes retenues pour leur efficacité et leur robustesse pour déterminer les paramètres d'un modèle pouvant aller jusqu'à une somme de trois exponentielles.

La Figure 9 présente l'évolution temporelle de la fluorescence normalisée d'un échantillon revêtu de zircone YSZ :  $\text{Eu}^{3+}$  pour un traitement thermique à 1200°C. Le modèle mono-exponentiel détermine le temps caractéristique de fluorescence du pic d'émission à 610 nm. Pour l'exemple présenté, le temps de vie estimé est ainsi de  $1.35 \pm 0.06 \text{ms}$  par la méthode de Laplace-Padé. La Figure 10 montre l'évolution du temps de vie de fluorescence avec la température pour la transition à 562 nm mesurée sur une poudre de zircone YSZ :  $\text{Er}^{3+}$ .

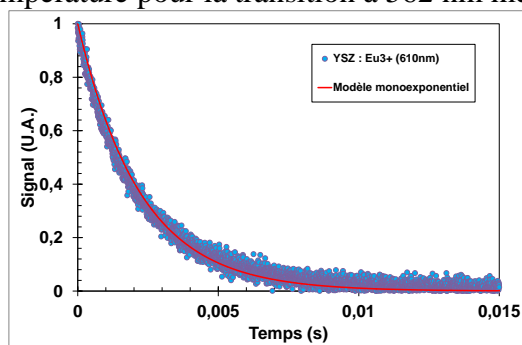


Figure 9 : Evolution de la décroissance de fluorescence normalisée pour la zircone YSZ :  $\text{Eu}^{3+}$  à 610 nm pour un traitement thermique de 1200°C.

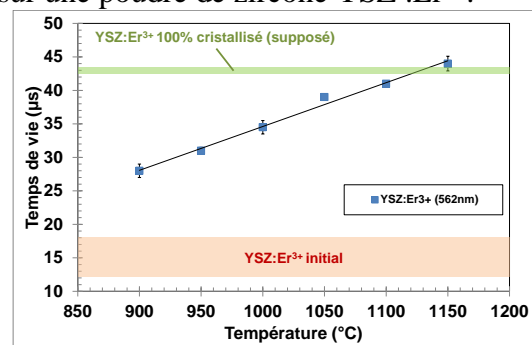


Figure 10 : Evolution du temps de vie de fluorescence à 562 nm de la poudre de zircone YSZ :  $\text{Er}^{3+}$  avec la température de traitement thermique.

La Figure 10 montre la croissance linéaire du temps caractéristique de 28  $\mu\text{s}$  à 44  $\mu\text{s}$  avec la température de traitement thermique sur la plage 900-1150°C. Comme précédemment, la résolution théorique de la méthode pour ce luminophore est calculé avec l'équation (1) à partir de la régression linéaire sur les points expérimentaux. Ainsi, la résolution théorique est ici comprise entre 2°C et 5°C sur la gamme de température comprise entre 900°C et 1100°C. Les luminophores qui présentent une évolution continue de leur temps de vie de fluorescence avec la température sont donc des candidats comme indicateur de l'histoire thermique.

## 6. Conclusion

Cet article a présenté les différentes méthodes de caractérisation des luminophores utilisés comme marqueurs de l'histoire thermique et les avantages offerts par ces méthodes ont été discutés.

La construction de spectres d'excitation pour choisir les longueurs d'onde optimales pour exciter la fluorescence des marqueurs thermiques a été développée à travers l'exemple de la zircone YSZ :Eu<sup>3+</sup>. L'étude des spectres d'émission de fluorescence de certains luminophores a montré une variation mesurable et continue des pics de fluorescence. Les rapports d'intensité obtenus à partir de ces mesures permettent de minimiser la sensibilité aux conditions expérimentales et de construire des courbes d'étalonnage pour exprimer la température des traitements thermiques antérieurs. La mesure du temps de vie, illustrée sur des revêtements et des poudres zircons YSZ :Eu<sup>3+</sup> et YSZ :Er<sup>3+</sup>, permet de disposer d'une méthode plus complexe à mettre en œuvre mais peu sensible aux conditions expérimentales.

Ces différentes méthodes permettent de caractériser les propriétés de fluorescence de luminophores et leur résolution thermique pour construire des courbes d'étalonnage afin de déterminer la température « vue » par le marqueur thermique dans le cadre d'applications industrielles. Les exemples présentés illustrent l'évolution continue des paramètres de fluorescence (intensités, temps de vie) au contraire des variations de couleur discrètes observées avec les peintures thermiques. Par la suite, l'association de plusieurs luminophores doit permettre un suivi thermique des matériaux sur de plus larges plages de températures.

### Références:

- [1] X. Courtois & al., IR thermography diagnostics for the WEST project, Fusion Engineering and Design (2014)
- [2] J. Douglas & al., An integrated approach to the application of high bandwidth optical pyrometry to turbine blade surface temperature mapping, 18<sup>th</sup> ICIASF (Toulouse, France)
- [3] M. Kuball & al., Time-Resolved Temperature Measurement of AlGaIn/GaN Electronic Devices Using Micro-Raman Spectroscopy, Electron Device Letters 28 (2007) 86-89
- [4] S. Bland, Nano-thermometry: Nanotechnology, Materials today 13 (2010)
- [5] G. Gaussorgues, « La thermographie infrarouge », Editions TEC et DOC (1999)
- [6] C. Lempereur & al., Surface temperature measurement on engine components by means of irreversible thermal coatings, Meas. Sci. Technol. 19 (2008)
- [7] A. Rabhiou & al., Phosphorescent thermal history sensors, Sens. Actuators -Phys. 169 (2011)
- [8] A.H. Khalid, K. Kontis, Thermographic phosphors for high temperature measurements: principles, current state of the art and recent applications, Sensors, 8 (2008), 5673–5744
- [9] G. Salek & al., Mn<sup>2+</sup> doped Zn<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> phosphors: Irreversible thermochromic materials useful as thermal sensors, Opt. Mater. 47 (2015) 323–327.
- [10] J.P. Feist & al., Determining Thermal History of Components, brevet US2011069735, 2011.
- [11] A.L. Heyes & al., Thermal history sensing with thermographic phosphors, in: AIP Conf. Proc., AIP Publishing, 2013: pp. 891–896.
- [12] J.P. Feist & al., ASME DC Journal of Turbomachinery Off-Line Temperature Profiling Utilizing Phosphorescent Thermal History Paints and Coatings, J. Turbomach. 137 (2015).
- [13] A. Rabhiou, A. Kempf, A. Heyes, Oxidation of divalent rare earth phosphors for thermal history sensing, Sens. Actuators B Chem. 177 (2013) 124–130.
- [14] Á.Y. González & al., Reusable Thermal History Sensing via Oxidation of a Divalent Rare Earth Ion-Based Phosphor Synthesized by the Sol–Gel Process, Heat Transf. Eng. 36 (2015)
- [15] A. Istratov, O. Vyvenko, Exponential analysis in physical phenomena, Rev. Sci. Instrum. 70 (1999)
- [16] J. Brübach & al., An algorithm for the characterisation of multi-exponential decay curves, Opt. Lasers Eng. 47 (2009) 75–79.
- [17] K. Levenberg, A method for the solution of certain non-linear problems in least squares, Q. Appl. Math. 2 (1944) 164–168.
- [18] D. Marquardt, An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters, J. Soc. Ind. Appl. Math. 11 (1963) 431–441.
- [19] Z. Bajzer, J.C. Sharp, S.S. Sedarous, F.G. Prendergast, Padé-Laplace method for the analysis of time-resolved fluorescence decay curves, Eur. Biophys. J. 18 (1990) 101–115