

Développement d'un banc expérimental dédié à la caractérisation de propriétés thermophysiques de métaux à hautes températures – Validation de la mesure de température par méthode multispectrale

Laurent DEJAEGERE^{1,2*}, Thomas PIERRE¹, Muriel CARIN¹, Philippe LE MASSON¹

¹ Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne (LIMATB) - EA4250

Université de Bretagne-Sud, Université Européenne de Bretagne

Rue de Saint Maudé, BP 92 116, 56 321 Lorient Cedex

² IRT Jules Verne

Chemin du Chaffault, 44 340 Bouguenais

(* auteur correspondant : laurent.dejaeghere@univ-ubs.fr)

Résumé – La simulation de certains problèmes exige la connaissance des propriétés thermophysiques au-delà de 1000°C. Cependant, les données dans la littérature sont rares et ce manque est dû essentiellement à la difficulté d'effectuer des mesures à ces niveaux de température. Cet article présente le développement d'un dispositif expérimental permettant d'atteindre des températures de 2500°C. L'accent est aussi mis sur la mesure de température par pyrométrie multispectrale à travers une première validation sur une expérience complémentaire.

Nomenclature

Lettres latines

c célérité de la lumière, $m \cdot s^{-1}$

d diamètre, m

h constante de Planck, $J \cdot s$

k constante de Boltzmann, $J \cdot K^{-1}$

s sensibilité, $A \cdot W^{-1}$

D distance, m

FT fonction de transfert, 1

H fonction de transfert, 1

I intensité électrique, A

J fonction à minimiser

L luminance, $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1}$

T température, K

Lettres grecques

$\delta\lambda$ intervalle, μm

ε émissivité, 1

λ longueur d'onde, μm

ρ réflectivité, 1

τ transmittivité, 1

Φ flux radiatif, W

Indices et exposants

c collimateur

d détecteur

env environnement

exp expérimental

f filtre

fo fibre optique

g Gleeble[®]

i, j numéro de filtre

m miroir dichroïque

s surface

th théorique

λ spectral

0 corps noir

1. Introduction

La simulation de procédés tels que le soudage ou la trempe de matériaux métalliques exige la connaissance de propriétés en fonction de la température. Suivant l'état du matériau, les propriétés peuvent se limiter aux caractéristiques thermophysiques (conductivité, diffusivité thermiques) ou à l'émissivité pour l'état solide et aller jusqu'à des propriétés telles que la viscosité ou la tension de surface à l'état liquide. Concernant plus particulièrement les aciers où les températures de fusion sont de l'ordre de 1500°C, un manque de données existe à partir de 1000°C. Les conditions expérimentales de température et de pression sont en effet extrêmes et il s'avère difficile de réaliser des expériences.

La littérature fait cependant état d'études sur les propriétés suivantes de métaux : la conductivité et la diffusivité thermiques [1], la chaleur spécifique, la masse volumique, la tension de surface, la viscosité [2]... L'article de Boivineau *et al.* [3] permet également de faire le point sur les techniques de caractérisation à hautes températures. Les principales difficultés liées à la mesure sont principalement dues aux contrôles des réactions chimiques et aux transferts de la chaleur. Ainsi, des études spécifiques sont-elles menées afin d'optimiser des modes de chauffage rapide ainsi que des méthodes limitant la pollution des matériaux avec par exemple l'utilisation de l'induction pour obtenir la lévitation de l'échantillon [2,4].

Parallèlement, il est primordial de connaître la température de l'échantillon étudié. Les méthodes avec contact – thermocouples – sont possibles mais peuvent pénaliser la mesure du fait de leur présence – effet d'ailette par exemple – et sont limitées par une température maximale d'utilisation [5]. Les techniques sans contact s'avèrent alors intéressantes pour mesurer la température mais le problème réside dans l'estimation de l'émissivité [6]. L'expérience montre que ce paramètre varie en fonction de la température, de la direction, de la longueur d'onde, mais aussi de l'état de surface [7]. Un principe classique d'estimation de la température est la méthode multispectrale qui consiste à mesurer le flux émis par une surface pour plusieurs longueurs d'onde [8] : le traitement des signaux permet d'estimer la température, mais aussi l'émissivité [9]. L'angle d'incidence de l'émission a son importance et dans le cadre de mesures à hautes températures, l'état de surface des métaux est également susceptible d'évoluer – phénomène d'oxydation [10] – et peut causer des problèmes lors des mesures.

Cet article explicite le développement d'un dispositif expérimental qui doit conduire à travailler sur deux axes. Le premier concerne la sollicitation thermique d'un échantillon déjà en température afin d'étudier son comportement et d'estimer certaines propriétés. Le second porte sur la mesure pyrométrique au-delà de 1000°C permettant de suivre d'une part la température et d'autre part l'émissivité. Dans un premier temps, les choix qui ont conduits aux dimensionnements de l'expérience sont détaillés. Dans un second temps, la méthode de mesure par pyrométrie multispectrale est présentée. Enfin, une validation de la technique de mesure de température est obtenue sur un dispositif indépendant.

2. Le dispositif à hautes températures

L'un des prérequis à la caractérisation de métaux à hautes températures est la création d'un environnement capable de maintenir un échantillon à cette température en évitant les réactions chimiques d'une part, avec le gaz autour de l'échantillon analysé, et d'autre part entre l'échantillon et les éléments l'entourant. Par ailleurs, les cinétiques thermiques rencontrées lors des procédés hautes températures pouvant être rapides, il est important d'être capable de les reproduire. La partie qui va suivre présente les choix technologiques retenus pour la création de ce dispositif ainsi que les raisons de ces choix.

2.1. Description du dispositif

La figure 1 présente un schéma axisymétrique du dispositif. Tout d'abord, le système de chauffage utilisé est un four à induction de 25 kW de type CELES-GHF25AP dont la fréquence de fonctionnement est fixée à 104 kHz. L'inducteur (1) de ce four induit un creuset en graphite R4550 (2) qui est lui-même entouré d'un isolant en graphite GFA (3). Ce chauffage par induction permet d'assurer un chauffage homogène du graphite et un contrôle de la température *via* un régulateur (thermocouple (4) de type C situé entre l'isolant et le graphite R4550). Le graphite GFA repose sur de la Stumatite® (5), un matériau réfractaire. L'objectif étant d'atteindre la fusion des aciers et afin d'éviter la pollution de ceux-ci, l'intérieur du creuset est recouvert d'une feuille de tungstène de 50 µm d'épaisseur.

L'ensemble des pièces du four est placé dans une enceinte étanche (6) en aluminium de 12 mm d'épaisseur permettant la mise sous vide ou sous gaz neutre (argon). Cette enceinte possède plusieurs accès afin de centrer et de positionner les différentes pièces. Un passage étanche via un presse-étoupe permet l'alimentation de l'inducteur. Enfin la visée pyrométrique est rendue possible grâce à une fenêtre en saphir (7) au-dessus de l'enceinte.

L'ensemble des propriétés thermophysiques des matériaux composant le dispositif (non-présenté ici) est issu de données constructeur ou bien de la littérature [7, 11-12].

2.2. Modélisation et simulation du chauffage

Afin de vérifier et avant validation expérimentale des choix technologiques, une simulation du comportement du système a été réalisée avec le logiciel Comsol[®] Multiphysics et l'échantillon testé dans le creuset est une pièce de tungstène. Cette simulation est basée sur les équations de la chaleur (conduction et rayonnement) et de l'électromagnétisme. Le modèle numérique est un modèle 2D axisymétrique qui se résout en deux étapes : la première consiste à faire une étude fréquentielle du champ magnétique, c'est-à-dire calculer l'énergie transmise par induction dans le creuset ; la seconde est une étude thermique utilisant cette énergie transmise par induction qui est considérée comme une source de chaleur interne constante. Les calculs de champ magnétique et de température sont donc complètement dissociés. Pour des raisons de temps de calcul, la transmission de l'énergie par induction est négligée dans l'argon. Le courant dans l'inducteur est modélisé par un courant de surface sur tout le contour de l'inducteur ayant une fréquence de 104 kHz. Les parois à l'extérieur de l'enceinte sont soumises à un coefficient de transfert convectif de $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

Suite à une étude de sensibilité, l'optimisation du maillage a conduit à raffiner les zones subissant les forts gradients thermiques et magnétiques, à savoir, autour de l'inducteur et dans le creuset.

Les résultats de cette simulation sont présentés sur les figures 1, 2 et 3. La figure 2 affiche les lignes de champ magnétique présentes autour de l'inducteur. L'intérêt d'un creuset de forte épaisseur est souligné par les niveaux des lignes de champ. En effet, l'épaisseur du creuset absorbe la quasi-totalité du champ magnétique conduisant à un champ magnétique résiduel dans l'échantillon analysé de l'ordre du champ magnétique terrestre.

La figure 1 montre, en régime permanent, une température d'échantillon de $2130^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$. Ce constat permet de souligner qu'en régime permanent il sera possible d'une part, d'obtenir des gradients thermiques faibles dans l'échantillon et, d'autre part, de négliger le champ magnétique dans celui-ci.

Enfin la figure 3 montre l'évolution temporelle de la température au centre de l'échantillon calculée par le modèle. L'inertie thermique apparaît importante avec un régime permanent atteint après plus d'une heure.

La validation du modèle passera par une confrontation de ces simulations dans un premier temps avec des mesures expérimentales réalisées avec des thermocouples dans la limite de leur fonctionnement, puis finalement avec des mesures pyrométriques. De plus, une analyse de sensibilité vis-à-vis des paramètres du modèle, en particulier sur les caractéristiques thermophysiques des matériaux fonction de la température, doit être menée.

3. Le banc pyrométrique et la méthode multispectrale

3.1. Description du banc pyrométrique

L'objectif principal est de pouvoir estimer la température de l'échantillon à partir de la mesure de flux sortant de la fenêtre saphir du four. La méthode de pyrométrie multispectrale a été retenue puisqu'elle permet également la détermination de l'émissivité dans la gamme spectrale de travail. Comme dit précédemment, les cinétiques thermiques rencontrées dans les procédés à hautes températures pouvant être rapides, le banc pyrométrique doit être aussi

réactif concernant la mesure de flux. Le choix s'est porté sur la mesure simultanée de flux à cinq longueurs d'onde situées dans la gamme spectrale visible-infrarouge proche à l'aide de détecteurs silicium dont la fréquence d'acquisition est de 10 kHz. Une partie du flux issu de la fenêtre saphir pénètre dans le collimateur puis est dirigée *via* une fibre optique dans un second collimateur avant le banc pyrométrique (Figure 4). Ce banc est composé de miroirs dichroïques (de propriétés optiques ρ_λ^m et τ_λ^m où l'exposant m désigne *miroir*) qui réfléchissent ou transmettent une partie du flux à une longueur d'onde de coupure donnée, de filtres monochromatiques caractérisés par une longueur d'onde moyenne $\bar{\lambda}$, une largeur de bande $\delta\lambda$ et une transmittivité spectrale τ_λ^f (f désigne *filtre*). Derrière chaque filtre se trouve un détecteur silicium ; ce dernier possède une sensibilité s_λ (données constructeur), fonctionne dans l'intervalle $[0,4 \mu\text{m} - 1,1 \mu\text{m}]$ et délivre une intensité électrique I proportionnelle au flux. Les cinq longueurs d'onde centrales des filtres monochromatiques sont : $\bar{\lambda}_1 = 480 \text{ nm}$, $\bar{\lambda}_2 = 530 \text{ nm}$, $\bar{\lambda}_3 = 680 \text{ nm}$, $\bar{\lambda}_4 = 850 \text{ nm}$ et $\bar{\lambda}_5 = 940 \text{ nm}$.

3.2. Expression du flux théorique reçu par les détecteurs

Expérimentalement, la fenêtre saphir et le collimateur de même diamètre d sont parallèles et distants de D . Par conséquent, le flux reçu par le collimateur est exprimée par (1) où L_λ^0 est la luminance exprimée par la relation (2) [13].

$$\Phi_\lambda^c = \varepsilon(\lambda) L_\lambda^0 \left(\frac{\pi d^2}{4D} \right)^2 \quad (1)$$

$$L_\lambda^0(T_s) \approx 2hc^2 \lambda^{-5} e^{-\frac{hc}{k\lambda T_s}} \quad (2)$$

Pour une surface opaque, isotrope et d'émissivité ε_λ , l'équation (2) qui calcule la luminance ne prend en compte que la contribution de la surface émettrice à une température T_s et néglige l'influence de l'environnement à température T_{env} . L'équation (2) exprimée sous la forme de l'approximation de Wien ($\lambda T_s \ll 14\,000 \mu\text{m}\cdot\text{K}$) fait apparaître les constantes universelles : $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$.

Les fonctions de transfert $H_{\lambda i}$ pour chaque voie qu'emprunte le flux jusqu'aux détecteurs sont données par les équations (3). À titre d'exemple et en suivant la figure 4, la fonction de transfert $H_{\lambda 4}$ (3.4) est le produit de la réflectivité du miroir 4, de la réflectivité du miroir 3 et de la transmittivité du filtre 4.

$$H_{\lambda 1} = \rho_{\lambda 4}^m \tau_{\lambda 3}^m \rho_{\lambda 2}^m \rho_{\lambda 1}^m \tau_{\lambda 1}^f \quad (3.1)$$

$$H_{\lambda 2} = \rho_{\lambda 4}^m \tau_{\lambda 3}^m \rho_{\lambda 2}^m \tau_{\lambda 1}^m \tau_{\lambda 2}^f \quad (3.2)$$

$$H_{\lambda 3} = \rho_{\lambda 4}^m \tau_{\lambda 4}^m \tau_{\lambda 3}^m \tau_{\lambda 3}^f \quad (3.3)$$

$$H_{\lambda 4} = \rho_{\lambda 4}^m \rho_{\lambda 3}^m \tau_{\lambda 4}^f \quad (3.4)$$

$$H_{\lambda 5} = \tau_{\lambda 4}^m \tau_{\lambda 5}^f \quad (3.5)$$

Il faut également prendre en compte les transmittivités des collimateurs τ_λ^c et de la fibre optique τ_λ^{fo} . Par conséquent, le flux théorique reçu par un détecteur i est :

$$\Phi_{\lambda i}^{d,th} = (\tau_\lambda^c)^2 \tau_\lambda^{fo} H_{\lambda i} \Phi_\lambda^c = FT_{\lambda i} \Phi_\lambda^c \quad (4)$$

$$\Phi_i^{d,th} = \frac{1}{2\delta\lambda_i} \int_{\bar{\lambda}_i - \delta\lambda_i}^{\bar{\lambda}_i + \delta\lambda_i} FT_{\lambda_i} \Phi_{\lambda}^c d\lambda \quad (5)$$

Ce flux théorique $\Phi_i^{d,th}$ est à comparer avec le flux expérimental $\Phi_i^{d,exp}$ donné directement par les détecteurs et issu de :

$$I_i = \frac{1}{2\delta\lambda_i} \int_{\bar{\lambda}_i - \delta\lambda_i}^{\bar{\lambda}_i + \delta\lambda_i} s_{\lambda} \Phi_{\lambda_i}^{d,exp} d\lambda \quad (6)$$

3.3. Principe de la méthode multispectrale

Le principe général de la méthode multispectrale repose sur l'utilisation de flux mesurés à différentes longueurs d'onde pour estimer la température et éventuellement les propriétés radiatives d'une surface émettrice. Rodiet *et al.* [14] détaillent deux méthodes de résolution mais ils ne s'intéressent uniquement qu'à l'estimation de la température. S'il est obligatoire de connaître la fonction de transfert du banc pyrométrique, il est cependant possible d'introduire une loi de comportement de l'émissivité $\varepsilon(\lambda)$ [9]. L'estimation repose sur la minimisation de l'écart quadratique entre grandeurs théorique et expérimentale. Dans le cas de mesure à cinq longueurs d'onde, la température T_s et ε_{λ} sont déterminées soit au moyen des équations (7) et (8) soit avec les équations (6) et (9).

$$J = \sum_{i \neq j} \left| T_s - T_{ij}^{exp} [\varepsilon(\lambda)] \right|^2 \quad (7)$$

$$T_{ij}^{exp} = \frac{hc(\lambda_j^{-1} - \lambda_i^{-1})}{k \ln \left[\frac{\Phi_i^{d,exp} \varepsilon(\lambda_j) FT_j \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)^{-5}}{\Phi_j^{d,exp} \varepsilon(\lambda_i) FT_i \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)} \right]} \quad (8)$$

$$J = \sum_{i=1}^5 \left| \Phi_i^{d,th} - \Phi_i^{d,exp} [T, \varepsilon(\lambda)] \right|^2 \quad (9)$$

Les essais qui suivent sont effectués à des températures n'excédant pas 1200°C environ et il a été constaté que seules deux longueurs d'onde (λ_4 et λ_5) donnaient des résultats exploitables. Il a par conséquent été retenu dans cette étude d'utiliser la pyrométrie multispectrale classique à deux couleurs, c'est-à-dire exploiter les résultats à partir de la relation (8) [15].

3.4. Premiers essais et validation du banc pyrométrique

Le banc pyrométrique a été testé à l'aide d'une machine d'essai (Gleeble[®] 3500). Cette machine permet d'étudier le comportement thermomécanique des métaux grâce à un chauffage par effet Joule. Les essais ont été réalisés sur une éprouvette plate en acier doux 1018 de 150 mm de long, 25 mm de large et 1 mm d'épaisseur placée entre deux mors en cuivre refroidis à l'aide d'une circulation d'eau (Figure 5). Quatre thermocouples de type K sont soudés sur la surface supérieure de l'échantillon : le thermocouple TC₁ est placé au centre de l'échantillon, les thermocouples TC₂ et TC₃ sont placés de part et d'autre à 10 mm de TC₁, le thermocouple TC₄ est placé à 30 mm de TC₁. Le thermocouple TC₃ est utilisé pour la régulation thermique de l'échantillon. Les essais sont réalisés en imposant un chauffage de 10°C·s⁻¹ avec des paliers de 30 s allant de 700°C à 1200°C par pas de 100°C (régimes statique et dynamique). Par la suite, la température de consigne de la Gleeble est notée T_g . Ces premiers essais étant réalisés à l'air ambiant, certains thermocouples se sont dessoudés

pendant l'essai en raison de problèmes d'oxydation. Seules les mesures de TC₃ et TC₄ ont été exploitables. La figure 5 montre également le collimateur, qui collecte le flux issu de la surface inférieure de l'échantillon, placé sous ce dernier et le diamètre de la surface émettrice, d'environ 20 mm, laquelle apparaît à l'aide d'une lumière blanche branchée sur la fibre optique. Le pyromètre permet donc de mesurer la température moyenne de cette zone.

Afin d'estimer les gradients de température de la surface émettrice, une simulation thermoélectrique 3D a été réalisée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics®. Les équations de conservation de l'énergie et de la charge électrique sont résolues dans l'échantillon et les mors en cuivre en tenant compte de la symétrie du système. La figure 6 montre le champ de température calculé pour une température maximale de palier de 1100°C. Les gradients de température au centre de l'échantillon sont relativement faibles avec un écart de 10°C pour la surface émettrice étudiée, comme le montre la figure 7. La comparaison entre les températures calculées et celles mesurées par les thermocouples TC₃ et TC₄ donne un bon accord.

La figure 8 montre une comparaison entre la température estimée par la méthode pyrométrique T_{45}^{exp} et celle mesurée par le thermocouple TC₃ ($\approx T_s$) en fonction du temps. Six signaux sont présentés : quatre en température (T_g , TC₃, TC₄ et T_{45}^{exp}) et deux en flux ($\Phi_4^{d,\text{exp}}$ et $\Phi_5^{d,\text{exp}}$). L'estimation de la température T_{45}^{exp} a été effectuée à l'aide de l'équation (8). Le rapport des émissivités est inconnu mais supposé égal à 1 (hypothèse du corps gris car $\lambda_5 - \lambda_4$ faible) et l'estimation a permis d'ajuster convenablement la température T_{45}^{exp} sur TC₃. Cependant, ce résultat n'est valable que jusqu'à environ 900°C ; au-delà le phénomène d'oxydation s'intensifie, les flux enregistrés augmentent et les paliers n'apparaissent plus clairement ; cela laisse à penser une évolution des émissivités qui se répercuterait sur l'estimation de la température. Par ailleurs, tout au long de l'expérience, les premières estimations permettent d'observer la bonne réactivité du dispositif pyrométrique lors des phases dynamiques.

4. Conclusion

Cette étude divisée en deux axes a permis de présenter les premiers résultats concernant le développement d'un dispositif hautes températures destiné à la caractérisation des métaux autour de leur point de fusion.

Les premières simulations numériques ont montré que la température de l'échantillon dans le creuset peut dépasser de façon quasi-homogène 2000°C. Cette simulation doit être confortée par le dispositif expérimental qui est en phase de développement.

Les résultats présentés dans le cadre du développement du banc pyrométrique sont encourageants et cohérents avec les mesures réalisées par thermocouple. L'estimation de la température par méthode multispectrale nécessite de maîtriser la fonction de transfert du banc pyrométrique : c'est en partie le cas. L'hypothèse du corps gris pour les deux filtres proche infrarouge a permis d'estimer une évolution de la température. Les tests ont également pu mettre en évidence le problème lié à l'oxydation à partir de 900°C. Enfin, à noter la bonne réactivité du dispositif pyrométrique pour suivre les cinétiques thermiques.

Ce travail se poursuit par l'introduction d'une loi d'évolution de l'émissivité en fonction de la longueur d'onde afin d'exploiter au mieux les cinq longueurs d'onde du banc pyrométrique et tout particulièrement à plus hautes températures. De plus, ces mesures seront réalisées sous ambiance contrôlée (argon). Par ailleurs, les flux théoriques et mesurés par le banc pyrométrique, qui ont été comparés, restent à conforter et les erreurs à quantifier.

Remerciements

Les auteurs remercient le FEDER, l'IRT Jules Verne (projet MAPEPAS) ainsi que la région Bretagne pour le financement de ces travaux.

Références

- [1] S. Mehmood *et al.*, *Modeling of Effective Thermal Conductivities of Alloy Series as a Function of Temperature in the Liquid Region*, Proceeding of the 18th symposium on thermophysical properties, Boulder, CO, USA, June 24-29. 2012.
- [2] G. Wille *et al.*, *Thermophysical Properties of Containerless Liquid Iron up to 2500 K*, International Journal of Thermophysics, Vol. 23, No. 5, September 2002.
- [3] M. Boivineau *et al.*, *Thermophysical properties of metals at very high temperatures obtained by dynamic heating techniques: recent advances*, Int. J. Materials and Product Technology, Vol. 26, Nos 3/4, 2006.
- [4] M. Watanabe *et al.*, *Measurements of Density and Structure of Alloys Liquids by Levitation Technique*, Proceeding of the 18th symposium on thermophysical properties, Boulder, CO, USA, June 24-29. 2012.
- [5] J.-P. Bardon, B. Cassagne, *Température de surface, mesure par contact*, Techniques de l'ingénieur, r2730.
- [6] H. R. B. Orlando *et al.*, *Thermal measurements and inverse techniques*, CRC Press, Taylor and Francis, Boca Raton, 2011.
- [7] J.-F. Sacadura, *Initiation aux transferts thermiques*, Ed. Tec&Doc., Paris, 2000.
- [8] T. Pierre *et al.*, *Micro-scale temperature by multi-spectral and statistic method in the UV-visible wavelengths*, J. Appl. Phys. 103(3), p.1-10, 2008.
- [9] T. Duvaut *et al.*, *Multiwavelength infrared pyrometry: optimization and computer simulations*, Infrared Physics & Technology 36 (1995) 1089-1103.
- [10] K.-H. Weng *et al.*, *Effect of oxidation on aluminium alloys temperature prediction using radiation thermometry*, International Journal of Heat and Mass Transfer 54 (2011) 4834-4843.
- [11] Y.S. Touloukian, *Thermal radiative properties*, Plenum, New York, 1970.
- [12] F. P. Incropera *et al.*, *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley & Sons, New-York, 2002.
- [13] R. Siegel, J. Howell, *Thermal radiation heat transfer*, 4th Ed. Taylor & Francis, New-York, 2002.
- [14] C. Rodiet *et al.*, *Optimisation of wavelength selection used for the multi-spectral temperature measurement by ordinary least squares method of surfaces exhibiting non-uniform emissivity*, Quantitative Infrared Thermography, 2013.
- [15] T. Pierre, *Mesure de la température à l'échelle microscopique par voie optique dans la gamme ultraviolet-visible*, thèse de doctorat, Nancy-Université, 2007.

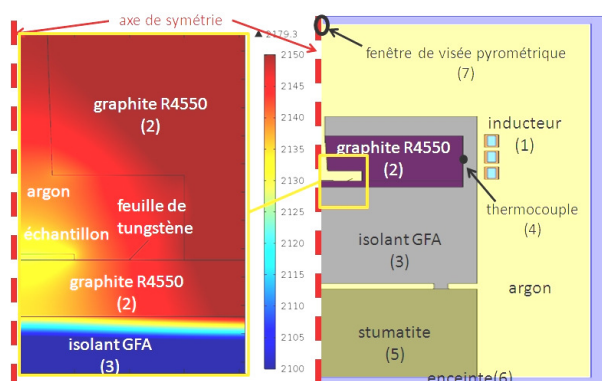


Figure 1 : schéma du dispositif hautes températures et modélisation à l'aide de Comsol[®] Multiphysics des échanges conducto-radiatifs dans l'enceinte et autour du creuset (températures en °C).

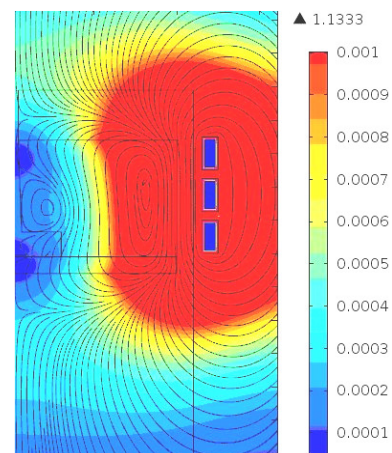


Figure 2 : lignes de flux magnétique. Le champ magnétique est exprimé en Tesla.

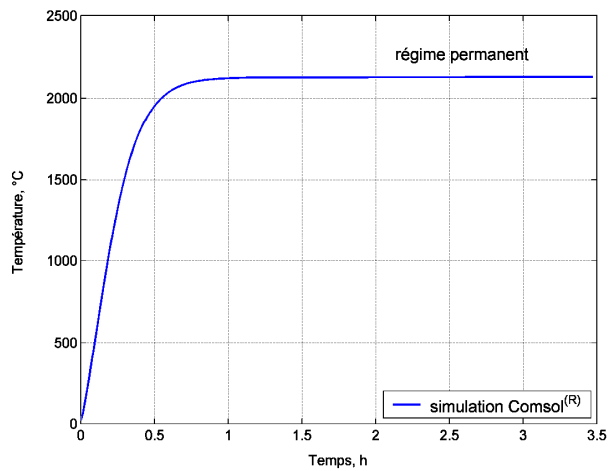


Figure 3 : évolution de la température au cours du temps au centre du creuset.

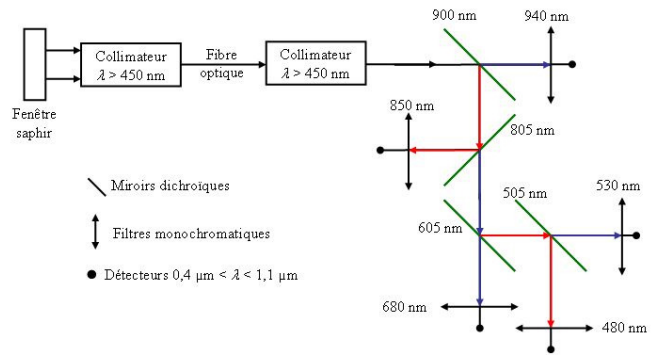


Figure 4 : banc pyrométrique.

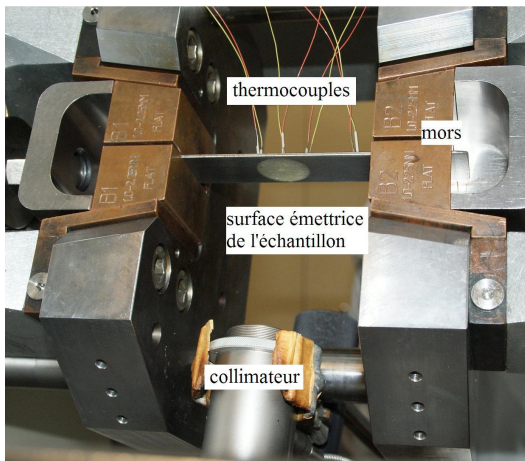


Figure 5 : photo du dispositif-test expérimental sur le banc d'essai Glebble®.

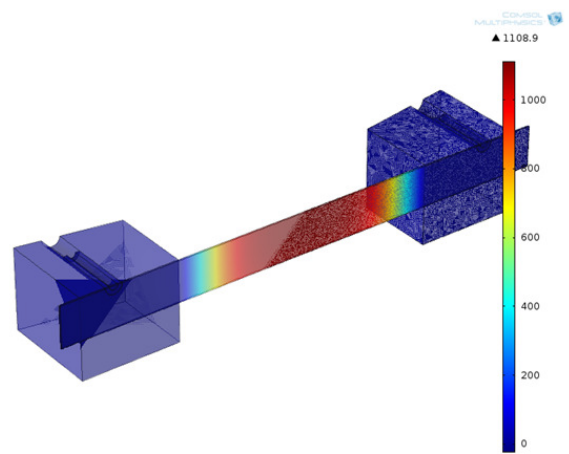


Figure 6 : Champ de température calculé par Comsol® Multiphysics au sein de l'échantillon d'acier pris entre les mors (température en °C).

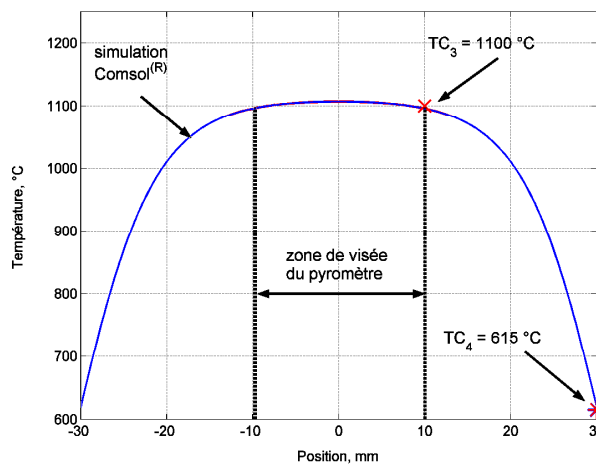


Figure 7 : simulation Comsol® Multiphysics du profil de température à la surface de l'échantillon et mise en évidence du faible gradient en son centre.

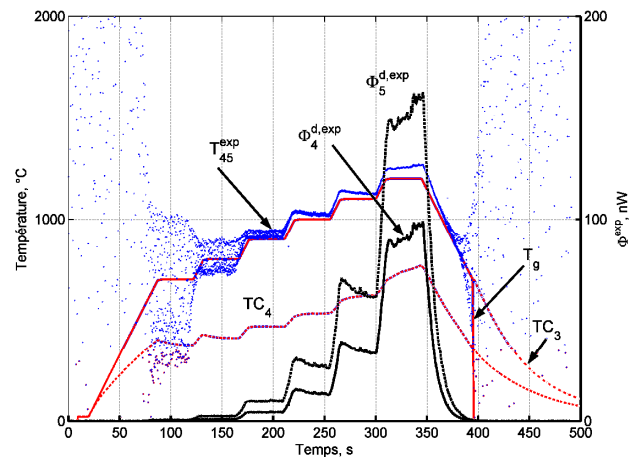


Figure 8 : résultats expérimentaux sur l'estimation de la température de la surface de l'échantillon. Le tracé présente les températures de consigne T_g , des thermocouples TC_3 et TC_4 , T_{45}^{exp} ainsi que les flux expérimentaux $\Phi_4^{d,exp}$ et $\Phi_5^{d,exp}$.