

Influence de l'atmosphère environnante pour des mesures de hautes températures par voie radiative.

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

¹ Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne - 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 – Lors d'une opération de soudage, les fortes amplitudes atteintes en température et les importantes cinétiques des phénomènes physiques impliqués font de la pyrométrie une technique non-intrusive adaptée. Le flux radiatif reçu par le pyromètre dépend de l'émissivité de la surface visée qui est elle-même susceptible d'évoluer, comme par exemple, en cas d'oxydation ou de changement de phase. De plus, à hautes températures, l'atmosphère ne peut plus être supposée transparente et devient participative. Afin de mieux appréhender la participation de l'atmosphère uniquement, une étude expérimentale a été menée pour estimer qualitativement son impact sur le flux radiatif dans des configurations différentes : vide, air, argon et hélium, et pour différentes nuances d'acier. Les expériences sont effectuées dans une machine de caractérisation thermomécanique Gleeble 3500[®]. Les éprouvettes sont chauffées par effet Joule à 900 °C et thermorégulées à l'aide d'un thermocouple placé sur la face opposée à la mesure pyrométrique (T_{c1} sur la figure 1). D'autres thermocouples sont placés le long de l'éprouvette en surface afin de valider l'homogénéité de la température de la zone visée (T_{c2} , T_{c3} et T_{c4} sur la figure 1). Les mesures pyrométriques sont réalisées à deux longueurs d'onde simultanément ($\lambda_1 = 0,85 \mu\text{m}$ et $\lambda_2 = 0,94 \mu\text{m}$), le diamètre de la zone visée est de 22 mm. Les flux expérimentaux sont exploités de deux façons : i) estimation de la température bichromatique avec l'hypothèse du corps gris ; ii) après étalonnage du pyromètre, estimation des émissivités pour chaque longueur d'onde. Cet article se propose, de comparer les différents résultats en termes de variation de flux et d'émissivité dans le but de quantifier l'impact de l'atmosphère sur des mesures à très hautes températures.

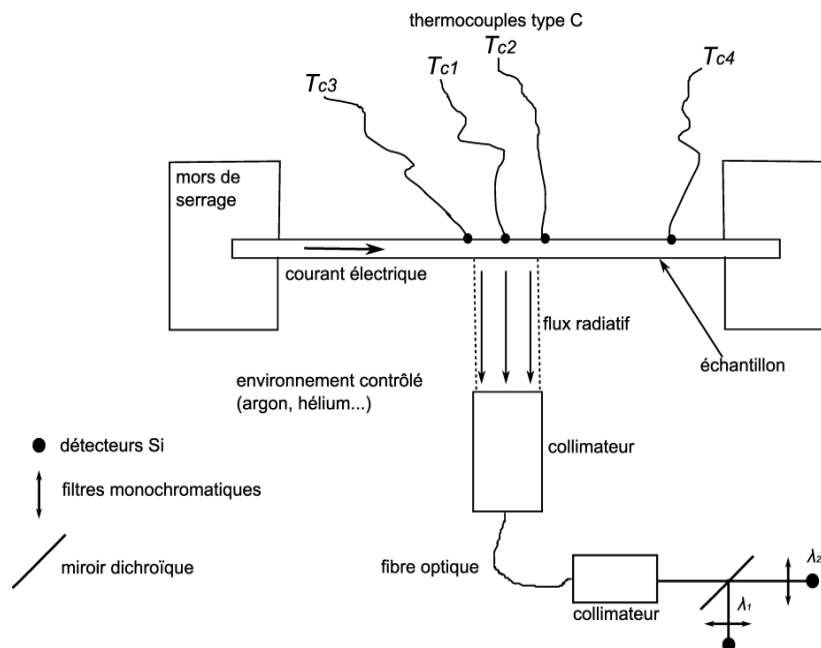


Figure 1 : Machine Gleeble[®] 3500, instrumentée en thermocouples et pyromètre.

Nomenclature

Lettres latines

C_1 constante, $W \cdot \mu m^4 \cdot m^{-2}$

C_2 constante, $\mu m \cdot K$

H fonction de transfert

T température, K

Lettres grecques

$\delta\lambda$ intervalle spectral, nm

ε émissivité

λ longueur d'onde, μm

θ température, $^{\circ}C$

Φ flux radiatif, W

Indices et exposants

c consigne

i numéro de filtre

r reçu

\bar{x} grandeur moyenne

1. Introduction

La fiabilité des simulations numériques des procédés de soudage passe i) par une amélioration de la connaissance des propriétés thermophysiques des métaux ; ii) par la mesure et le suivi de la température lors du procédé lui-même. L'expérience montre que la caractérisation des matériaux à hautes températures est peu courante. Boivineau en propose néanmoins un état de l'art [1] en précisant que si les premiers efforts ont été fournis pour les métaux purs, ils doivent être poursuivis pour les alliages. Les principales propriétés physiques déterminées sont classiquement la conductivité thermique, la diffusivité thermique, la capacité calorifique, la chaleur latente et la tension de surface.

La mesure *in situ* de la température lors d'un procédé peut être envisagée de deux façons : à l'aide de thermocouples et/ou sans contact par voie radiative.

L'utilisation d'un thermocouple implique un aspect intrusif et des difficultés à hautes températures. Pour ces raisons, la mesure radiative s'avère plus appropriée, mais elle est tributaire de la connaissance de l'émissivité, paramètre susceptible d'évoluer dans le temps et fonction de la longueur d'onde, de la température, de l'état de surface principalement [2]. De plus, la méthode multispectrale est pertinente puisqu'elle permet l'estimation simultanée de la température [3] et/ou de l'émissivité [4]. De nombreuses études se sont orientées sur le choix et le nombre de longueurs d'onde à utiliser [5] ainsi que sur le type de modèle représentatif de l'émissivité avec la longueur d'onde et/ou la température [6-7]. De plus, la grande majorité des mesures est effectuée en régime permanent ; les difficultés augmentent en régime instationnaire du fait de cinétiques de plus en plus rapides [8-9].

Dans le cas d'une opération de soudage, l'atmosphère devient participative (évaporation de la surface, absorption/émission) [10]. Il est commun dès lors de travailler sous atmosphère environnante contrôlée : vides primaire ou secondaire, argon, hélium pour les plus courantes. Dans tous les cas, la nature de cette atmosphère a une influence sur le flux radiatif collecté par le détecteur et cette influence peut être interprétée dans le traitement du signal comme une évolution de l'émissivité. Cet article se propose de présenter les premiers résultats expérimentaux d'une étude de l'impact de l'atmosphère par la mesure d'émissivité sur des aciers de nuances différentes (DC04, DP600, 304L). Les atmosphères utilisées sont l'air, l'argon, l'hélium et le vide. L'échantillon est thermorégulé à 900 °C.

2. Le dispositif expérimental

Le dispositif expérimental présenté sur la Figure 1 se compose de deux parties : la machine Gleeble 3500[®] et le banc optique (le pyromètre).

2.1. La machine Gleeble 3500[®]

Cette machine permet d'étudier le comportement thermomécanique des métaux soumis à une contrainte de traction et/ou de compression lors d'un chauffage par effet Joule. Ainsi, il est possible, dans le cadre de cette étude, de compenser les forces de compression liées à la dilatation de manière à garder une contrainte mécanique nulle. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes plates de 150 mm de long, 25 mm de large et 1 mm d'épaisseur placées entre deux mors en cuivre refroidis à l'aide d'une circulation d'eau. Quatre thermocouples de type K sont soudés sur la surface supérieure de l'éprouvette : le thermocouple T_{C1} est placé au centre de l'échantillon. Il est utilisé pour la régulation thermique de l'éprouvette (ici 900 °C). Les thermocouples T_{C2} et T_{C3} sont placés de part et d'autre à 10 mm de T_{C1} . Le thermocouple T_{C4} est placé à 30 mm de T_{C1} (figure 1). Ces derniers sont utilisés pour contrôler l'homogénéité de la température. Les trois nuances d'acier testées sont : un acier à haute déformabilité (DC04), un acier de structure (DP600) et un acier inoxydable (304L). Pour les mesures sous vide secondaire, les éprouvettes sont chauffées seulement quand le vide secondaire est atteint. Pour les mesures sous argon et hélium, la chambre est tirée au vide (vide primaire) puis remplie avec le gaz neutre. Cette opération est répétée trois fois. Les éprouvettes sont dépolies avant essai.

2.2. Le banc optique

À la température de consigne de 900°C, seuls deux détecteurs sont utilisables alors que le banc optique en compte cinq [9]. Ce dernier (figure 1) est composé d'une fenêtre saphir de protection placée sous incidence normale à 20 mm de l'éprouvette, de deux collimateurs reliés par une fibre optique, d'un miroir dichroïque, de deux filtres monochromatiques ($\lambda_1 = 0,85 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ et $\lambda_2 = 0,94 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) et de deux détecteurs silicium. Le banc optique collecte donc le flux émis par l'éprouvette et restitue les fractions reçues $\Phi_{\lambda_1}^r$ et $\Phi_{\lambda_2}^r$ aux deux longueurs d'onde λ_1 et λ_2 . La fréquence d'acquisition est de 100 Hz permettant une analyse statistique.

Comme ici $\lambda T \ll C_2$, le flux Φ_i^r , pour une longueur d'onde λ_i , reçu par un capteur est écrit selon l'équation (1), avec $H(\lambda)$ la fonction de transfert qui est déterminée à l'aide d'une calibration avec un corps d'émissivité connue.

$$\Phi_i^r = \frac{1}{2\delta\lambda} \int_{\bar{\lambda}_i - \delta\lambda}^{\bar{\lambda}_i + \delta\lambda} H(\lambda_i) \varepsilon_{\lambda_i} C_1 \lambda_i^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda_i T}} d\lambda \quad (1)$$

L'estimation de la température T_{12} est effectuée par la méthode bispectrale (sur λ_1 et λ_2) en faisant l'hypothèse que $\varepsilon_{\lambda_1} \approx \varepsilon_{\lambda_2}$. En première approximation ($\delta\lambda \ll \lambda_i$), il est possible de simplifier le calcul intégral de (1) et d'aboutir à l'expression de la température bichromatique T_{12} (2). Le rapport des fonctions de transfert \bar{H}_2 / \bar{H}_1 au dénominateur est ensuite déterminé par un étalonnage, dont l'objectif est de calibrer le banc optique à l'aide d'un échantillon étalon, et de définir les fonctions de transfert \bar{H}_1 et \bar{H}_2 (respectivement $4,669 \times 10^{-9}$ et $7,397 \times 10^{-9}$). Ensuite, avec la température de consigne, l'hypothèse du corps gris est confirmée ou réfutée *a posteriori* par le calcul des émissivités ε_1 et ε_2 (3).

$$T_{12} = \frac{C_2 (\bar{\lambda}_2^{-1} - \bar{\lambda}_1^{-1})}{\ln \left[\frac{\Phi_1^r \bar{H}_2 \left(\frac{\bar{\lambda}_2}{\bar{\lambda}_1} \right)^{-5}}{\Phi_2^r \bar{H}_1 \left(\frac{\bar{\lambda}_2}{\bar{\lambda}_1} \right)} \right]} \quad (2)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\Phi_i^r}{\bar{H}_i C_1 \bar{\lambda}_i^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda_i T}}} \quad (3)$$

3. Les mesures expérimentales

Dans cette étude, le banc optique est calibré à l'aide d'un échantillon en carbone (de type R4550) d'émissivité connue et constante $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 0,93$ [11] et sous un vide secondaire de l'ordre de 10^{-9} Pa. Cette calibration a également permis de visualiser les gradients de température sur l'éprouvette à l'aide des tracés des quatre thermocouples placés en face arrière. La figure 2 présente ces évolutions : il apparaît que les trois thermocouples T_{C1} , T_{C2} et T_{C3} , présentent une variation de température de 0,6 % entre le centre de l'éprouvette (T_{C1}) et à 10 mm de part (T_{C2}) et d'autre (T_{C3}). On considèrera donc que la zone visée par le pyromètre est homogène en température.

L'ensemble des résultats des mesures de pyrométrie, à 900 °C de consigne, sur le carbone et sur toutes les nuances d'acier est présenté dans le tableau 1. Les valeurs présentées dans ce tableau sont issues des moyennes des signaux mesurés sur plusieurs minutes. La précision indiquée correspond à l'écart-type des valeurs mesurées ou calculées et ne prend pas en compte les erreurs systématiques liées à la calibration.

L'étanchéité de la machine Gleeble 3500[®] n'étant pas parfaite, le vide secondaire maximal obtenu est compris entre 10^{-7} et 10^{-9} Pa. Les expériences ont montré que seul un vide de l'ordre de 10^{-9} Pa évite toute contamination de l'échantillon à 900 °C. Cette contamination semble commencer à partir d'un vide de l'ordre de 10^{-7} Pa, conduisant à la création d'une fine couche d'oxyde. Néanmoins, les mesures ont toujours été effectuées à pression constante.

La figure 3 présente un exemple de mesure sur un acier DC04 : les flux et la température de consigne sont tracés au cours du temps avec le changement d'ambiance. Les variations de flux en fonction de l'atmosphère environnante sont visibles. L'influence de l'atmosphère environnante sur la pyrométrie est un problème couplé entre l'oxydation, la convection, l'absorption et la conductivité thermique du gaz. Afin d'écartier les variations de mesure liées à l'oxydation, une mesure sur du carbone a été réalisée (tableau 1) dans trois configurations (vide, argon et hélium). Sous vide et donc sans effet des gaz, la chaîne pyrométrique nous permet de calculer une température de (905 ± 2) °C, et ainsi valider son étalonnage. En effet, la régulation thermique de l'échantillon étant réalisée par un thermocouple non-positionné dans une isotherme, la mesure locale sous-estime la température de la plaque.

En comparant les résultats sous argon avec les précédents, nous obtenons ici une température bichromatique supérieure avec des flux plus importants. Dans l'hypothèse où le gaz a une influence, deux origines sont possibles : soit la température de la surface est plus importante, soit l'étalonnage des fonctions de transfert doit intégrer la nature du gaz. Comme ces deux phénomènes sont couplés, il est difficile d'en isoler un pour l'identifier. Malgré une erreur cumulée liée à la mesure par thermocouple dans la régulation (sous-estimation de la température de surface), nous supposons, dans un premier temps, que l'émissivité n'a pas changée entre les cas sous vide et sous argon (0,93), et recalculons la température bichromatique ($T = 917$ °C) ; les fonctions de transfert étant conservées identiques. Dans un second temps, si le gaz influence la fonction de transfert en retirant une partie du flux perçu, différente en fonction des longueurs d'onde (figure 4), le rapport H_2/H_1 va dans le cas de l'argon augmenter, et donc la température bichromatique calculée augmenter. Cette

hypothèse, bien que non réellement démontrée, va dans le sens des calculs obtenus ($T > 905^{\circ}\text{C}$). De plus, il est difficile d'analyser les effets capacitif et conductif du gaz qui devrait accentuer les pertes en surface de l'échantillon.

Contrairement au cas de l'argon, la comparaison des résultats sous vide et sous hélium laisse apparaître une température bichromatique inférieure avec des flux plus faibles. Ici encore les deux origines d'erreur se retrouvent. En reprenant l'hypothèse d'une émissivité constante (0,93), la température bichromatique calculée avec les fonctions de transfert identiques nous conduit à une valeur de 892°C . L'analyse de l'effet du gaz par un retrait de flux fonction des longueurs d'onde (figure 4), induit un rapport H_2/H_1 plus petit et donc une température plus faible. Hypothèse allant dans le sens du calcul réalisé. De plus, les effets capacitif et conductif accentuent le phénomène.

Cette première analyse sur le carbone constitue un étalonnage, même partiel, pour les trois cas d'atmosphère (vide, argon, hélium) est en partie réutilisable pour l'étude sur les aciers afin d'examiner les effets de l'oxydation sur les mesures pyrométriques et sur l'émissivité. Ainsi, dans le cas du vide, nous pouvons considérer que les fonctions de transfert sont *a priori* connues. En revanche, pour les cas de l'argon et de l'hélium, seules des tendances peuvent être déterminées.

L'analyse qui va suivre sur les métaux est relative et non quantitative. Dans le cas des analyses sous vide, deux cas sont difficilement exploitables du fait d'un faible rapport signal sur bruit (DP600 et DC04) conduisant à des incertitudes sur la température bichromatique calculée importantes (de l'ordre de la centaine de $^{\circ}\text{C}$) (cases gris foncé du tableau 1). De plus, les émissivités recalculées étant faibles, elles confirment les faibles flux perçus. Par contre, dans le cas du 304L, des flux suffisants sont perçus donnant, d'une part, une température calculée avec une incertitude faible à une valeur de 919°C , et d'autre part, des émissivités cohérentes à la littérature pour un acier légèrement oxydé (0,57).

		surface	Φ_1^r , nW	Φ_2^r , nW	T_{12} , $^{\circ}\text{C}$	ε_1	ε_2
DC04	vide (10^{-9} Pa)	no	7,4±0,1	10,8±0,1	934±127	0,19±0,08	0,20±0,08
	air	o	17,7±0,1	28,4±0,1	859±24	0,86±0,03	0,82±0,03
	argon	o	21,6±0,1	33,4±0,1	889±14	1,00±0,01	1,00±0,02
	hélium	o	16,3±0,2	25,3±0,3	886±21	0,89±0,02	0,86±0,03
DP600	vide (10^{-7} Pa)	no	7,0±0,8	10,8±1,0	902±81	0,34±0,03	0,34±0,04
	air	o	20,3±1,3	31,1±1,9	892±28	0,96±0,03	0,95±0,04
	argon	o	18,5±2,2	27,3±3,1	930±31	0,86±0,03	0,89±0,04
	hélium	o	16,2±0,2	25,1±3,2	879±33	0,79±0,03	0,77±0,04
304L	vide (10^{-7} Pa)	t	15,5±0,1	23±0,1	919±3	0,57±0,01	0,57±0,01
	air	t	20,5±0,2	31,2±0,2	897±30	0,95±0,03	0,95±0,04
	argon	t	21,5±0,1	30,1±0,1	971±33	0,91±0,03	0,98±0,04
	hélium	t	15,1±0,2	23,9±0,3	864±38	0,74±0,03	0,71±0,04
Carbone	vide (10^{-9} Pa)	/	20,3±0,1	30,7±0,1	905±2	0,93±0,01	0,93±0,01
	argon	/	22,4±0,1	33,4±0,1	917±2		
	hélium	/	16,0±0,1	24,5±0,1	892±3		
Mesure ou calcul fiables			Mesure ou calcul entachés d'erreurs		Rapport signal/bruit trop faible		

Tableau 1 : récapitulatif des mesures et calculs effectués pour toutes les nuances d'acier et pour les atmosphères environnantes. o:oxydé ; no : non-oxydé ; t : traces d'oxydation.

Dans le cas des analyses sous gaz, les états de surface étant plus oxydés, les flux perçus sont plus importants et peuvent donc conduire à une interprétation plus fiable (cases gris clair du tableau 1). Néanmoins le degré d'oxydation n'étant pas connu précisément, l'analyse ne peut être que qualitative. En effet, pour les trois nuances d'acier, les températures bichromatiques calculées sont systématiquement plus élevées pour l'argon que pour l'hélium, montrant bien la cohérence des analyses effectuées au préalable sur le carbone. Afin de compléter ces analyses, une étude de l'influence du gaz sur la température de l'échantillon, dissociée de l'influence du gaz sur le rayonnement, doit être menée.

4. Conclusion

Dans cette étude, des mesures expérimentales de température et d'émissivité ont été effectuées sur un carbone et différentes nuances d'acier en faisant varier l'atmosphère environnante. Ces mesures ont été réalisées à l'aide d'un pyromètre bichromatique. La gamme spectrale étudiée est : $0,85 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ et $0,94 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

La chaîne de mesure a été étalonnée sous vide utilisant un échantillon de carbone d'émissivité connue. L'influence du changement d'environnement (argon et hélium) a été mise en évidence de manière qualitative sur cet échantillon lors des calculs de température et d'émissivité. Deux hypothèses ont été avancées concernant la source de cette influence : la température de la surface est plus importante ; l'étalonnage des fonctions de transfert doit intégrer la nature du gaz. Comme ces deux phénomènes sont couplés, il est difficile d'en isoler un pour l'identifier. Les tendances restent les mêmes vis-à-vis des nuances d'aciers. Une étude quantitative pourra être menée si une étude préalable sur les échanges thermiques liés aux gaz lors de l'expérience est réalisée.

Ces conclusions permettent de mieux appréhender les travaux futurs sur les mesures de température par voie radiative. En effet, le banc optique présenté est destiné à être utilisé sur une opération de soudage ou sur toute autre opération à très haute température et a également pour vocation le contrôle de la température d'un dispositif de caractérisation thermophysique à hautes températures [9].

De plus, La fiabilité des mesures sous vide présentées dans cet étude ont montré une transposition possible du suivi en température lors d'une opération de soudage par faisceau d'électron (sous vide).

Remerciements

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

Références

- [1] Boivineau M. *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.
- [2] Incropera F. P., *Introduction to Heat Transfer*. John Wiley & Sons, 2011.
- [3] Pierre T., Rémy B., Degiovanni A., *Micro-scale temperature by multi-spectral and statistic method in the UV-visible wavelengths*, J. Appl. Phys. 103(3), p. 1-10, 2008.
- [4] Wen C.-D., Maduwar I., *Mathematical determination of emissivity and surface temperature of aluminium alloys using multispectral radiation thermometry*, International Communication in Heat and Mass Transfer 33 (2006) 1063-1070.

- [5] 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, 10(2), p. 222-236, 2013.
- [6] Duvaut T., Georgeault D., et Beaudoin J. L., *Multiwavelength infrared pyrometry: optimization and computer simulations*, Infrared Phys. Technol., vol. 36, n° 7, p. 1089-1103, déc. 1995.
- [7] Rodiet C., Pierre T., Rémy B., Degiovanni A., *Influence of measurement noise and wavelengths on the temperature measurement of opaque surface with variable emissivity by a multi-spectral method based on the flux ratio in the infrared-ultraviolet range*, High temperatures – High pressures, article accepté pour publication, 2015.
- [8] Rodiet C., Pierre T., Rémy B., Degiovanni A., *Mesure de température par méthode multispectrale*, Actes du congrès de thermique SFT, Perpignan, 24 – 27 mai 2011, p. 495-500.
- [9] Dejaeghere L., Pierre T., Carin M., Le Masson P., *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*, actes du congrès de thermique SFT, Lyon, 3 – 6 juin 2014.
- [10] Jarwitz M., *Temperature distribution at the cutting front during CO₂-laser cutting of aluminium*, 16th International Workshop Process fundamentals of laser welding and cutting, 5 - 7 février, Söllerhaus Hirschegg, Autriche, 2014.
- [11] Touloukian Y. S., DeWitt D., *Thermal radiative properties:metallic elements and alloys*, Thermophysical Properties of Matter., vol. 7. IFI/Plenum, 1972.
- [12] Lide D. R., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 85th Edition, CRC Press, 2004.
- [13] Meubus P., Parent J. R., *Temperature Distributions in a Helium Plasma*, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol 47, 1969, 536-542.

Figures

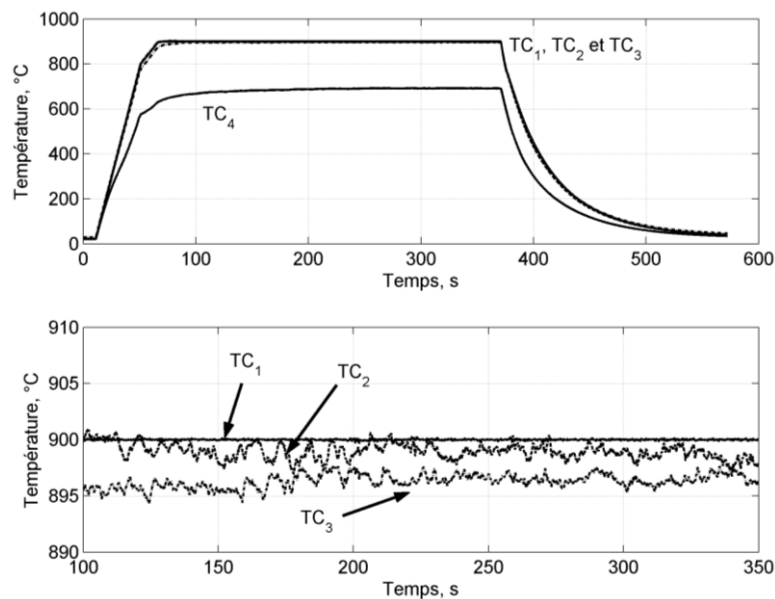


Figure 2 : tracés des températures enregistrées aux quatre thermocouples. Vues générale en haut et réduites en bas.

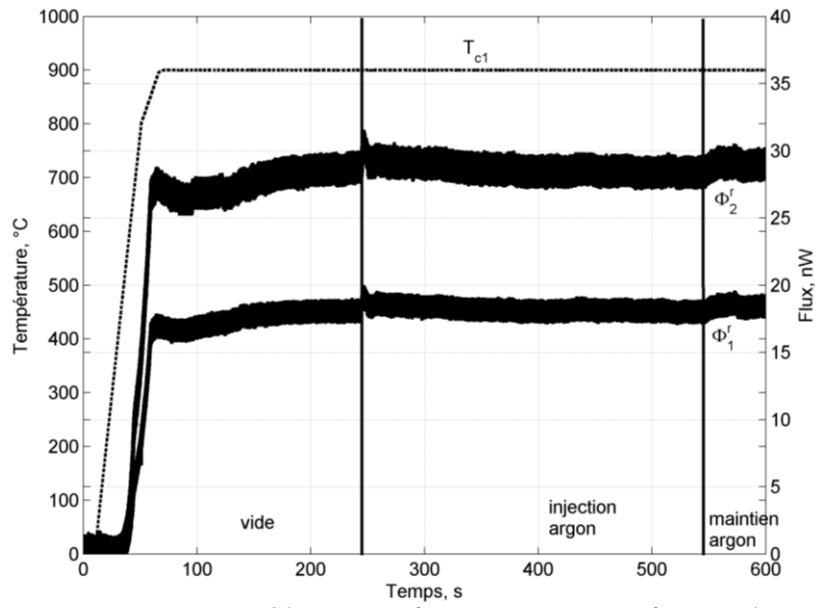


Figure 3 : mesure avec acier DC04 sous ambiance progressive d'argon (voir tableau 1).

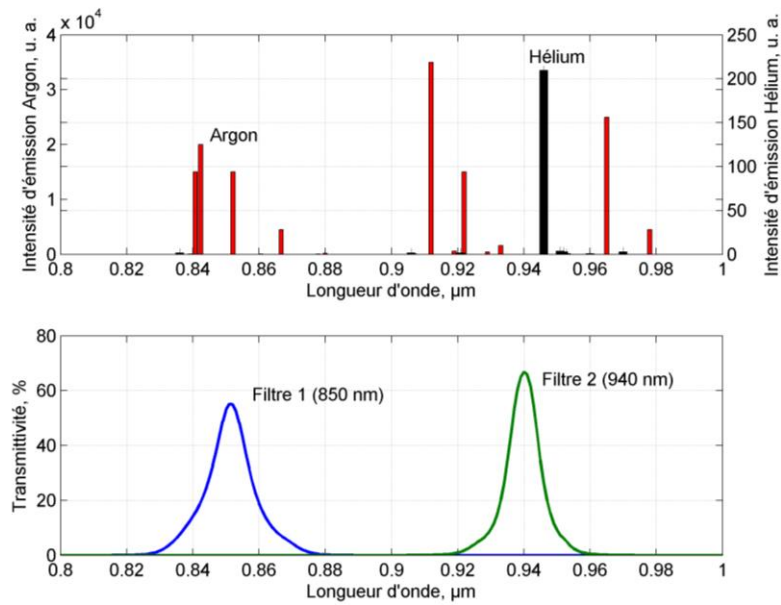


Figure 4 : correspondance entre les raies d'émission de l'argon et de l'hélium (en haut) et les zones spectrales des détecteurs (en bas).