



**HAL**  
open science

# Etude des comportements statique et dynamique de matériaux métalliques par pyrométrie ultraviolet, visible et infrarouge

Vincent Pina, Nicolas Ranc, Philippe Hervé, Guy Sutter, Sylvain Philippon,  
Danièle Wagner

## ► To cite this version:

Vincent Pina, Nicolas Ranc, Philippe Hervé, Guy Sutter, Sylvain Philippon, et al.. Etude des comportements statique et dynamique de matériaux métalliques par pyrométrie ultraviolet, visible et infrarouge. Colloque Photomécanique 2004, 2004, Albi, France. hal-00283729

**HAL Id: hal-00283729**

**<https://hal.science/hal-00283729>**

Submitted on 17 Jan 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Etude des comportements statique et dynamique de matériaux métalliques par pyrométrie Ultraviolet, Visible ou Infrarouge

**Vincent Pina, Nicolas Ranc, Philippe Hervé**

LEEE - EA 387, Université Paris X – Nanterre

1 chemin Desvallières, 92410 VILLE D'AVRAY, FRANCE

email : [vincent.pina@u-paris10.fr](mailto:vincent.pina@u-paris10.fr), [nicolas.ranc@u-paris10.fr](mailto:nicolas.ranc@u-paris10.fr), [pherve@u-paris10.fr](mailto:pherve@u-paris10.fr)

**Guy Sutter, Sylvain Philippon**

LPMM – UMR 7554, ISGMP, Université de Metz

Ile du Saulcy, 57045 METZ CEDEX 1, FRANCE

email : [sutter@lpmm.univ-metz.fr](mailto:sutter@lpmm.univ-metz.fr), [philippon@enim.fr](mailto:philippon@enim.fr)

**Danièle Wagner**

LMSS/MAT – UMR 8579, Ecole Centrale de Paris

Grande voie des vignes, 92295 CHATENAY MALABRY, FRANCE

email : [wagner@mssmat.ecp.fr](mailto:wagner@mssmat.ecp.fr)

---

*RESUME : Afin d'étudier le comportement de métaux sous différentes formes de sollicitation (torsion, traction) ou différents procédés de fabrication (soudage, usinage à grande vitesse), nous avons développé plusieurs types de pyromètres en fonction de leurs longueurs d'onde de mesure. Le choix du domaine spectral de chaque pyromètre résulte d'un compromis entre la plus petite longueur d'onde possible et un flux rayonné par l'éprouvette suffisamment intense pour être détecté. En effet, plus la longueur d'onde sera courte et moins l'erreur sur la mesure de température sera importante.*

---

## 1. Introduction au rayonnement des solides

Tout corps porté à une certaine température  $T$  émet un rayonnement thermique de longueurs d'onde comprises entre  $0,1 \mu\text{m}$  et  $1000 \mu\text{m}$  (cf. Figure 1).

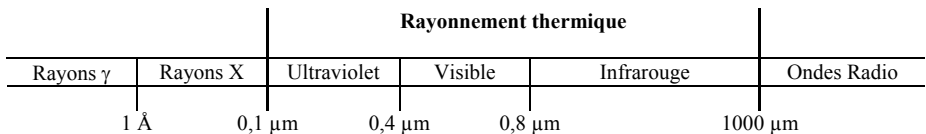


Figure 1 : Spectre électromagnétique

## 1.1. Le rayonnement du corps noir

En rayonnement, le corps noir qui est un émetteur parfait sert de référence. L'expression de sa luminance monochromatique est donnée par la loi de Planck :

$$L_{(\lambda,T)}^{\circ} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (1)$$

avec les constantes de Planck :  $C_1 = 1,191062 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$  et  $C_2 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ , la température  $T$  en K, la longueur d'onde  $\lambda$  en  $\mu\text{m}$ .

Pour une température fixée,  $L_{(\lambda,T)}^{\circ}$  présente un maximum correspondant à une longueur d'onde  $\lambda_{\text{max}}$ . La loi du déplacement de Wien, dont l'expression est donnée par la formule (2), permet d'exprimer cette longueur d'onde.

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (2)$$

## 1.2. Le rayonnement des corps réels

Le facteur d'émission monochromatique  $\varepsilon_{\lambda}$ , toujours compris entre 0 et 1 ( $\varepsilon_{\lambda} = 1$  pour un corps noir), caractérise le rayonnement d'une surface réelle par rapport à celui d'un corps noir porté à une température identique. Celui-ci est défini par :

$$\varepsilon_{\lambda} L_{(\lambda,T)}^{\circ} = L_{(\lambda,T)} \quad (3)$$

## 2. Présentation de la pyrométrie

La pyrométrie optique repose sur la théorie du rayonnement du corps noir. La mesure du flux rayonné par une surface permet effectivement de quantifier sa température à l'aide de la loi de Planck. Les dispositifs de mesure qui y sont associés présentent de nombreux avantages par rapport aux techniques classiques, telle que la mesure par thermocouple [Childs et al.,00] : ce sont des techniques de mesure non intrusives, par conséquent il n'y a pas de risque de perturbation du milieu étudié ; le temps de réponse peut être très faible, et cela permet donc d'étudier des phénomènes instationnaires et très rapides ; la résolution spatiale peut être très bonne, puisqu'elle n'est limitée que par la longueur d'onde de mesure (phénomène de diffraction). Cependant, le principal inconvénient de la pyrométrie réside souvent dans la difficulté d'interprétation du signal délivré par le capteur. En faisant les hypothèses que le flux réfléchi par la source et l'atténuation due à l'absorption du milieu environnant sont négligeables, l'expression du flux  $\Phi_e$  émis par la source est donnée par la relation :

$$\Phi_e = S \, d\omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} \varepsilon_{\lambda} L_{(\lambda,T)}^{\circ} \, d\lambda \quad (4)$$

avec la surface visée  $S$  en  $\text{m}^2$ , l'angle solide  $d\omega$  en sr,  $R_{\lambda}$  la réponse spectrale du capteur, les bornes du domaine spectral  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  en  $\mu\text{m}$ .

Le problème revient donc à déterminer la valeur de la température de la source à partir de la mesure de  $\Phi_e$ . La principale difficulté provient alors de la méconnaissance

de son facteur d'émission. Bien qu'il soit possible de le mesurer, le dispositif expérimental est complexe notamment à haute température. Par ailleurs, il existe des techniques pour éliminer le facteur d'émission [Hervé,83], mais celles-ci ne sont pas toujours adaptées à nos problèmes. Pour s'affranchir du facteur d'émission, on considère que la surface se comporte comme celle d'un corps noir et la température que l'on mesure est alors appelée température de luminance. La relation qui relie la température vraie  $T_v$  d'une surface à sa température de luminance  $T_l$  est :

$$\frac{1}{T_v} = \frac{1}{T_l} + \frac{\lambda}{C_2} \ln(\varepsilon_\lambda) \quad (5)$$

Afin de minimiser la différence entre  $T_v$  et  $T_l$ , nous choisissons toujours la plus petite longueur d'onde possible pour développer nos pyromètres, car comme le montre la Figure 2, l'effet thermométrique est plus important aux courtes longueurs d'ondes. A partir de 1000 K et pour une élévation de température de 100 K, la luminance augmente de 200 % à 1,2  $\mu\text{m}$ , alors qu'elle augmente seulement de 20 % à 9  $\mu\text{m}$ . De plus, plus la longueur d'onde est courte et plus l'erreur sur la température liée au facteur d'émission est faible (cf. Figure 3).

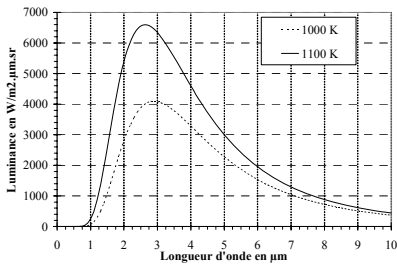


Figure 2 : Effet thermométrique

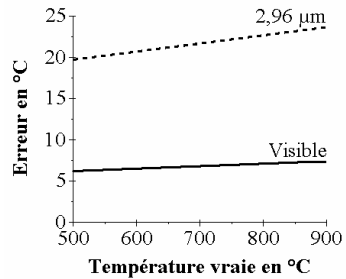


Figure 3 : Erreur sur la température vraie

### 3. Applications en fonction des différents domaines spectraux

Le choix de la longueur d'onde de mesure d'un pyromètre dépend essentiellement du flux émis par la surface à étudier (donc de sa température) et du temps de mesure dont on dispose. En fonction de ces deux principaux paramètres, on cherchera le meilleur compromis entre une énergie mesurable et la plus courte longueur d'onde possible. Nous avons ainsi appliqué ce principe aux différents pyromètres que nous avons développés, afin de les adapter aux contraintes liées aux études sur la mesure des hautes températures, le cisaillement adiabatique, l'usinage à grande vitesse et la caractérisation des matériaux.

#### 3.1. Température d'un cordon de soudure par pyrométrie monochromatique ultraviolet

Pour des phénomènes mettant en jeu de hautes températures ( $> 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ), et dès lors que le temps de mesure le permet (de l'ordre de 10 ms), on peut choisir une longueur d'onde dans l'ultraviolet. Le principal avantage d'un tel dispositif est d'être particulièrement bien adapté au milieu industriel, puisque la mesure du flux rayonné ne nécessite pas de condition de luminosité ambiante particulière. Un tel pyromètre a été développé pour mesurer la température d'un cordon de soudure liant deux tubes en acier

bout à bout. La thermographie de la Figure 4 a été obtenue à l'aide d'une caméra CCD intensifiée munie d'un filtre interférentiel centré à  $0,38 \mu\text{m}$ . L'étalonnage du dispositif de mesure avec un corps noir placé dans les mêmes conditions nous permet de déterminer, à partir d'un profil numérique (cf. Figure 5), la température de luminance du cordon de soudure (cf. Figure 6). La température de luminance moyenne de ce cordon est de  $1148^\circ\text{C}$ . Pour des émissivités comprises entre  $\epsilon_{\text{acier}} = 0,4$  et  $\epsilon_{\text{oxyde}} = 0,7$  [Touloukian et DeWitt,70], sa température vraie moyenne est alors de  $1171 \pm 10^\circ\text{C}$ .

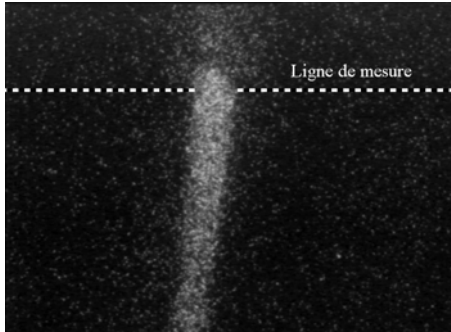


Figure 4 : Thermographie ultraviolette d'un cordon de soudure

Conditions d'essais :

$\lambda = 0,38 \mu\text{m}$   
 Temps d'exposition = 20 ms  
 Résolution = 60  $\mu\text{m}$

Dimensions de l'image :

Largeur = 50 mm  
 Hauteur = 40 mm

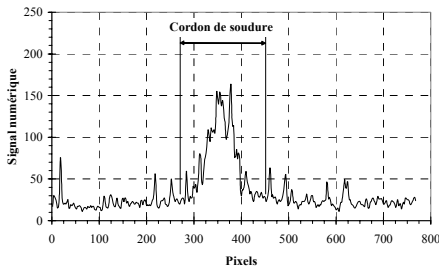


Figure 5 : Profil numérique de la ligne de mesure (cf. Figure 4)

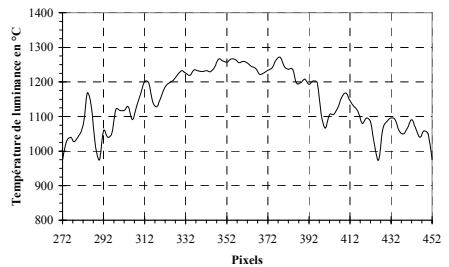


Figure 6 : Profil de température de luminance du cordon de soudure

### 3.2. Usinage à grande vitesse

Durant un processus d'usinage à grande vitesse tel que la coupe orthogonale, une grande partie de l'énergie mécanique est transformée en chaleur au niveau de l'interface outil-copeau. Cette quantité de chaleur engendre alors une augmentation substantielle de la température dans cette zone. Afin d'optimiser les conditions de coupe d'un tel procédé, il est indispensable de connaître précisément la répartition des températures dans la zone de coupe.

L'originalité du dispositif utilisé (cf. Figure 7) est qu'il permet d'atteindre des vitesses de coupe comprises entre 10 et  $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

A l'aide d'une caméra CCD intensifiée, nous avons réalisé un pyromètre à  $0,8 \mu\text{m}$  pour mesurer la température du copeau [Sutter et al.,03]. Cela nous a permis notamment d'étudier l'influence de la vitesse de coupe, ainsi que celle de la profondeur de passe (cf. Figure 8) sur le profil de température d'un copeau obtenu à partir d'éprouvettes en

acier 42CD4. Une photographie de la zone de coupe obtenue durant un essai est présentée sur la Figure 9. La Figure 10 représente la cartographie en température de cette même zone. La température maximale atteinte au cours de cet essai est de 825°C.

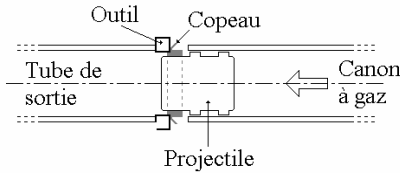


Figure 7 : Schéma du dispositif de coupe orthogonale

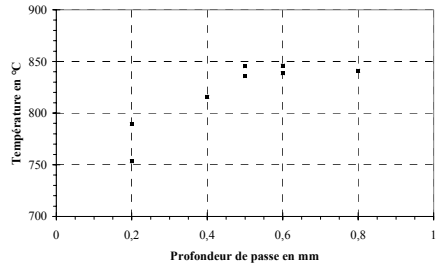


Figure 8 : Evolution de la température en fonction de la profondeur de passe ( $\alpha = 0^\circ$  et  $40 \text{ m.s}^{-1}$ )

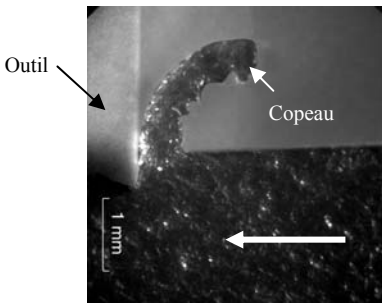


Figure 9 : Copeau en formation

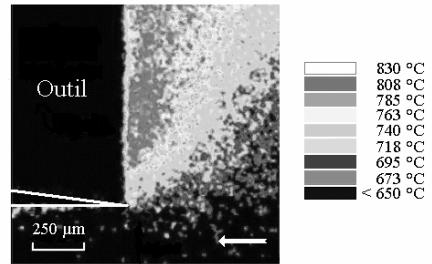


Figure 10 : Thermographie visible obtenue en  $64 \mu\text{s}$  ( $\alpha = 0^\circ$  et  $20 \text{ m.s}^{-1}$ )

### 3.3. Etude du cisaillement adiabatique du TA6V

Lors de la déformation plastique d'un matériau, une partie de l'énergie apportée est convertie en chaleur. Cela se traduit par une élévation de la température du matériau. Si il y a une localisation de la déformation, des bandes de cisaillement peuvent alors apparaître (cf. Figure 11). Lorsque que cette localisation intervient au cours d'un processus à grande vitesse, la quantité de chaleur produite par cette déformation n'a pas le temps de se dissiper avant la rupture, on parle alors de bandes de cisaillement adiabatique (BCA). Nous avons développé deux pyromètres pour étudier l'évolution de la température d'une BCA : l'un dans le visible (caméra CCD intensifiée) pour mesurer les températures maximales atteintes dans les BCA [Pina et al.,97], et l'autre dans l'infrarouge (barrette de 32 détecteurs InSb) pour mesurer la température au début de la localisation [Ranc et al.,03].

Un dispositif de poinçonnage dynamique a été réalisé pour générer des BCA (cf. Figure 12). Des températures maximales de l'ordre de  $1300^\circ\text{C}$  ont été mesurées. La thermographie de la Figure 13 montre la dissipation de la chaleur dans une BCA. Celle-ci a été obtenue avec un temps de mesure de 1 ms. L'étude du début de la localisation s'effectue avec des barres d'Hopkinson utilisées en torsion. Le principe de la mesure est

présenté sur la figure 14. Les courbes de la Figure 15 montrent les évolutions de la contrainte et de la température. Le changement brutal de pente de la courbe de température traduit le passage entre la phase de déformation homogène et le début de la localisation. On observe à cet instant, où la déformation est de 35 %, une chute de la contrainte. Le début de la localisation apparaît ici vers 200°C.



Figure 11 : Micrographie d'une BCA obtenue dans du TA6V (épaisseur : 2 mm)

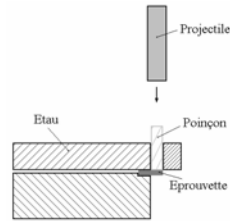


Figure 12 : Schéma du dispositif de poinçonnage

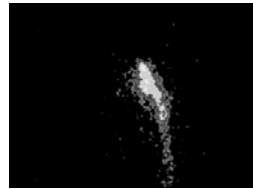


Figure 13 : Thermographie à 0,634 μm d'une BCA (Temps de d'exposition : 1 ms)

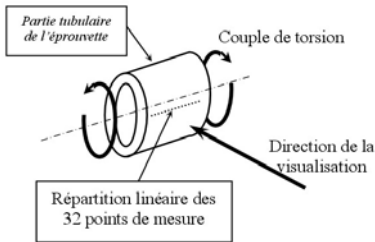


Figure 14 : Schéma de principe de la torsion

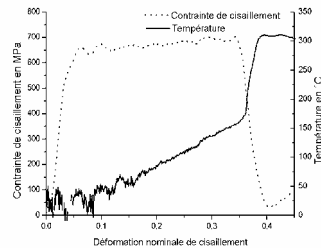


Figure 15 : Localisation de la déformation

### 3.4. Phénomène Portevin - Le Chatelier

Sous certaines conditions de température  $T$  et de vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}$ , le phénomène de vieillissement dynamique qui résulte de l'interaction dislocations mobiles – atomes interstitiels ou substitutionnels peut se manifester dans de nombreux alliages métalliques [Estrin et Kubin,95]. Dans une partie de ce domaine ( $T, \dot{\epsilon}$ ), il peut apparaître sur la courbe de traction des discontinuités qui portent le nom de phénomène Portevin-Le Chatelier (PLC) et qui résultent de la propagation de bandes de déformation plastique localisée [Mc Cormick et al.,93]. Ces bandes PLC résultant de la localisation de la déformation plastique sont donc le siège d'une élévation de la température et l'enregistrement de la température à la surface de l'éprouvette au cours de l'essai est un moyen de visualiser et de comprendre la formation de ces bandes.

Des éprouvettes prismatiques de longueur utile 60 mm en alliage de cuivre sont sollicitées en traction avec une vitesse de déformation constante ( $7,7 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), à la température de 20°C. Compte tenu de la gamme de température à mesurer (de 20 à 40°C), les mesures ont été effectuées par pyrométrie dans le domaine infrarouge (gamme du détecteur MCT : 3,7 à 4,9  $\mu\text{m}$ ), avec une fréquence d'acquisition de 60 Hz et un temps d'ouverture de 1500  $\mu\text{s}$ . La résolution spatiale est de 0,4 mm par pixel. Pour minimiser l'erreur due au facteur d'émission, les éprouvettes ont été recouvertes d'une fine couche de peinture noire fortement émissive.

La courbe contrainte déformation ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) d'un alliage aluminium cuivre présente des hachures caractéristiques de l'effet PLC (cf. Figure 16). La technique de mesure par pyrométrie permet de tracer sur cette courbe l'évolution de la température en 3 points fixes sur l'éprouvette (A, B, C distants de 15 mm). La Figure 17 montre une série de thermographies consécutives à la formation d'une bande de déformation (zone (a) sur la Figure 16) et met en évidence une déformation plastique localisée. La soustraction de 2 thermographies successives précédant et suivant la formation d'une bande permet d'obtenir une cartographie des variations de température sur l'éprouvette (cf. Figure 18). Il est alors possible de mesurer précisément les caractéristiques géométriques des bandes PLC. A partir de l'équation de la chaleur et en faisant l'hypothèse que le phénomène est adiabatique, on trouve une relation entre la variation de température et la variation de déformation plastique :  $\Delta\epsilon_p = \rho C_p \Delta T / (\beta \sigma)$ , avec  $\rho$  la masse volumique,  $C_p$  la capacité calorifique et  $\beta$  le coefficient de Taylor-Quiney. Pour une déformation totale de 10 %, on mesure un incrément de déformation plastique de 0,8 % dans une bande PLC.

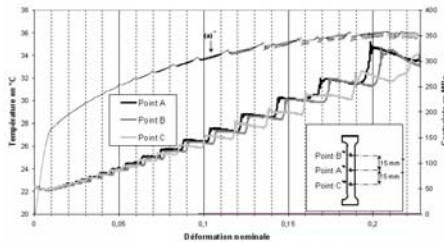


Figure 16 : Courbe Contrainte – Déformation

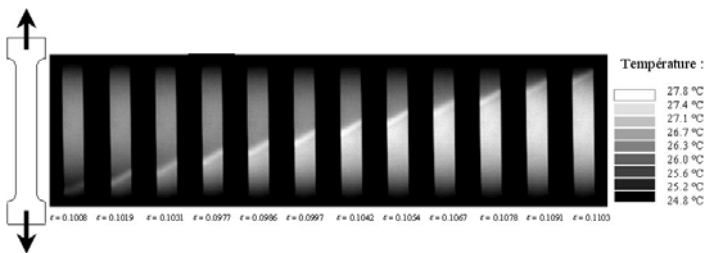


Figure 17 : Thermographies des bandes de déformation



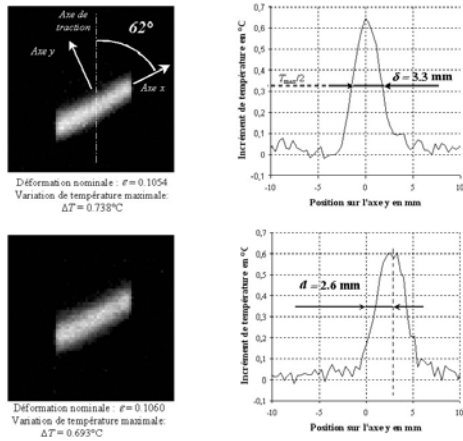


Figure 18 : Géométrie des bandes PLC

## 4. Conclusion

Bien qu'il soit plus aisé de suivre des variations de température dans l'infrarouge, car le flux thermique y est plus important, nous avons montré avec ces quelques applications, que dans certains cas la pyrométrie dans le visible ou l'ultraviolet était encore plus précise pour la mesure de la température.

## 5. Bibliographie

- [Childs et al.,00] P. R. N. Childs, J. R. Greenwood, C. A. Long, Review of temperature measurement, Review of scientific Instruments, 71, 8, 2000, 2959-2978.
- [Estrin et Kubin,95] Y. Estrin, L. P. Kubin, Continuum Models for Materials and Microstructure, H. B. Mühlhaus, Wiley, New York, 1995, 395.
- [Hervé,83] P. Hervé, Mesure simultanée de la température de surface et de son émissivité, Mesure, 485, 1983, 20-24.
- [Mc Cormick et al.,93] P. G. Mc Cormick, S. Venkadesan, C. P. Ling, Scripta Met., 29, 1993, 1159.
- [Pina et al.,97] V. Pina, A. Riguet, P. Hervé, P. Muller, Mesures de température et de changement de phase de bandes de cisaillement adiabatique dans un alliage de TA6V, J. Phys. IV France 7, 1997, 277-282.
- [Ranc et al.,03] N. Ranc, V. Pina, P. Hervé, L. Taravella, P. F. Louvigné, Experimental study of temperature heterogeneity in metallic materials under high strain rate sollicitation, J. Phys. IV France 110, 2003, 417-422.
- [Sutter et al.,03] G. Sutter, L. Faure, A. Molinari, N. Ranc, V. Pina, An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining, Int. J. Machine Tools and Manufacture, 43, 2003, 671-678.
- [Touloukian et DeWitt,70] Y. S. Touloukian, D. P. DeWitt, Thermophysical properties of matter-Thermal radiative properties, IFI/Plenum, New-York, vol. 7, 1970.