

Nouvelle méthode de mesure de la température de paroi du verre au cours de son meulage et effet des paramètres de façonnage

Tala MOUSSA^{1*}, Bertrand GARNIER², Hassan PEERHOSSAINI³

¹Laboratoire GRESPI – Thermomécanique, Facultés des Sciences BP1039, 51687 Reims,

²Laboratoire de Thermocinétique, CNRS 6607, Université de Nantes B.P. 50609, 44306 Nantes cdx 3,

³Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, Lab. Interdiscipl. Energies de Demain - (LIED), 75013 Paris.

* (auteur correspondant : tala.moussa@univ-reims.fr)

Résumé Lors du procédé de meulage de plaques de verre, les températures de ce matériau peuvent être très élevées et atteindre celle de la transition vitreuse typiquement autour de 550 à 600°C. La tenue mécanique du verre étant très affectée, le meulage ne s'effectue plus correctement. Pour étudier les phénomènes thermiques à l'interface du point de vue scientifique (flux généré, résistance thermique de contact...) ou bien du point de vue technologique (déterminer l'effet des paramètres de façonnage afin d'optimiser la production), il est important d'être capable d'accéder à la température du verre notamment à l'interface verre-meule, c'est à dire la température de paroi du verre.

Les mesures des températures du verre lors du meulage sont cependant difficiles. Les techniques classiques évoquées dans certains travaux de meulage de pièces métalliques telles que la thermographie infrarouge ou les thermocouples filaires ne conviennent pas dans le cas du verre. En effet en ce qui concerne les techniques radiatives, le meulage se fait dans un carter en raison de la projection d'eau et de débris de verre et les surfaces étudiées ne sont donc pas accessibles. La technique plus classique consistant à implanter des thermocouples filaires n'est également pas envisageable dans le cas de plaque de verre, ce matériau étant difficile à usiner. Par ailleurs, en raison du déplacement de la meule autour du verre, il s'avère que les échauffements sont extrêmement localisés à proximité du bord du verre meulé (longueur de diffusion de 0,08 à 0,25mm selon la valeur de la vitesse d'avance entre 5 et 30 m.min⁻¹). Pour pallier à ces difficultés, un nouveau procédé a été développé en utilisant une technique originale à base de bandes de thermocouples collées sur les deux côtés de la vitre, le contact thermoélectrique étant établi par la meule constituée de particules de diamant et de liant métallique. Hormis la possibilité de réaliser des températures, un des avantages est que la prise de température est à proximité de l'interface verre-meule. En outre, cette technique permet le suivi de la température tout au long du parcours de la meule autour du verre.

A l'aide de bandes de constantan et de cuivre d'une épaisseur de 50 µm, on a pu relever la température de paroi du verre. Il s'est avéré que la température atteinte lors du meulage dépendait très fortement de différents paramètres de meulage tels que la profondeur de passe, les vitesses d'avance et de rotation de la meule. Lors des essais réalisés sur site industriel, on a pu constater que les températures de paroi du verre étaient typiquement comprises entre 250 et 700°C. Par ailleurs, la mise en place de bande de constantan ou cuivre de part et d'autre de la plaque de verre par l'intermédiaire de bandes adhésives est susceptible d'introduire un biais et de modifier la température du verre. A l'aide d'un modèle numérique approprié, on a chiffré le biais de mesure engendré. Il est apparu être bien inférieur à la dispersion des mesures de température.

Mots-clés: meulage, verre, bandes de thermocouple, flux généré, transfert thermique

Nomenclature

C_p	chaleur spécifique, J.kg.K ⁻¹	ρ	masse volumique kg.m ⁻³
h	coefficient d'échange, W.m ² .K ⁻¹	δ	écart
T	température, °C	φ	densité de flux de chaleur, W.m ⁻²
n	vecteur normal	Q	flux de chaleur W
V	vitesse, m.s ⁻¹		

Symboles grecs

λ conductivité thermique, W.m⁻¹.K⁻¹

Indices et exposants

a avance

ext extérieur

1. Introduction

Il s'agit d'étudier l'effet des paramètres de meulage sur la température du verre dans un dispositif industriel de façonnage de ce matériau afin d'améliorer la production de vitre pour des applications dans le domaine de l'automobile. Un des points clés de cette étude est la mise en place d'une technique de mesure de température sur verre. Dans la littérature, les travaux sur les transferts thermiques lors du meulage du verre sont quasi inexistantes, ceci pouvant s'expliquer en partie par la difficulté à instrumenter le verre. La littérature concernant le meulage de pièces métalliques est plus abondante. Ainsi, avec ce type de matériau, plusieurs techniques de mesure de température ont été développées. Les approches typiques sont de deux types: la mesure sans contact et la mesure en contact direct. La mesure sans contact comprend des techniques radiatives comme la thermographie infrarouge qui permet d'obtenir des images thermiques [1] ou des pyromètres infrarouges avec phototransistor et fibres optiques [2]. Alors que la méthode par contact direct telles que l'usage de thermocouples comprend les thermocouples bi-polaires et unipolaires. Les thermocouples à double pôle sont généralement insérés en dessous de la surface de la pièce et les unipolaires sont insérés dans la pièce ou dans l'outil affleurant la surface (Peklenik [3]). Par la suite, Nee et al. [4] ainsi que Rowe et al. [5] ont remplacé le fil par une feuille de constantan. Lefebvre et al. [6] ont utilisé la même technique en utilisant une feuille de constantan d'épaisseur quelques micromètres sur un substrat de mica. Cependant ces techniques sont intrusives et nécessitent le chiffrage des biais de mesures dus à l'implantation de ces capteurs. Ces études sont réalisées souvent en résolvant l'équation de chaleur en 3D à l'aide de méthodes numériques (différences finies ou éléments finis). Ainsi Obikawa et al. [7] ont analysé les biais de mesure en fonction des conditions opératoires du procédé de meulage (longueur de contact, vitesse d'avance,...) et en fonction des caractéristiques géométriques et physiques de la pièce, de l'outil et du capteur de température.

Les techniques de mesure précédemment évoquées et dédiées au meulage de pièces métalliques ne conviennent pas pour le cas du verre vu la difficulté à implanter des thermocouples et l'aspect très localisé des échauffements. La seule possibilité est l'installation de capteur directement sur le verre et notamment au niveau de l'interface meule-verre c'est-à-dire au bord de la plaque de verre. Dans la présente étude, une nouvelle technique de mesure de la température sur verre lors de son meulage est mise en place. Des mesures expérimentales sont présentées pour différents paramètres du procédé de meulage. Les biais induits par la mise en place de cette nouvelle technique de mesure de température sont finalement estimés par une approche numérique pour la résolution de l'équation de la chaleur du système meule/verre/capteur de température.

2. Matériaux

La nouvelle technique de mesure de la température du verre consiste à placer des bandes de thermocouples de part et d'autre de la plaque de verre, la meule comportant un liant métallique

réalisant le contact thermoélectrique (*Figure 1*) ; on obtient alors un thermocouple dit à contacts séparés. Contrairement à la technique de Lefebvre [8] les thermocouples sont installés parallèlement à la direction de déplacement de la meule. L'intérêt est de suivre la température de l'interface meule / verre tout au long de son déplacement autour de la vitre.

Les bandes utilisées sont en constantan (Cu55 - Ni45, largeur: 10 mm, épaisseur: 50 μm) et en cuivre 3M adhésif (largeur: 10 mm, épaisseur Cu: 50 μm , adhésif double face: 25 μm). Les bandes de constantan sont maintenues sur le bord des plaques de verre à l'aide d'un ruban adhésif double face (épaisseur 75 μm). Le thermocouple de type T ainsi formé est étalonné en température en régime transitoire jusqu'à 400°C afin d'éviter l'oxydation du cuivre. La sensibilité obtenue est de 51 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ à 20°C correspondant à la valeur habituelle. Ainsi on a utilisé une loi polynomiale classique pour l'étalonnage sur la gamme de température étudiée.

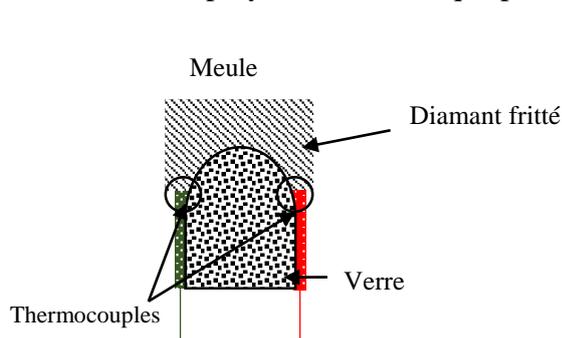


Figure 1 : Principe de mesure de température

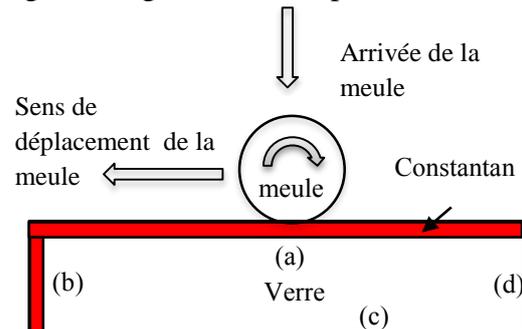


Figure 2 : Plaque de verre instrumentée

3. Dispositif expérimental

Des plaques de verre de dimensions 900 x 500 mm² et d'épaisseur 2,1 mm sont utilisées. Une chaîne Yokogawa modèle DL750 assure l'acquisition de la température durant le meulage. La température ambiante est de 18°C. Les paramètres d'enregistrement sont : fréquence d'échantillonnage 50 Hz, sensibilité temporelle 20 s/div et sensibilité en tension 10 mV/div. La meule (*Figure 2*) de diamètre 136,37 mm, est animée à la fois d'un mouvement de rotation et de translation caractérisée respectivement par une vitesse de rotation variable allant de 10 à 60 m.s⁻¹ et une vitesse d'avance réglable de 5 à 30 m.min⁻¹.

4. Résultats

4.1. Constats généraux

Lors des mesures avec le dispositif industriel instrumenté, on a pu réaliser un certain nombre de constats :

- Lors du premier tour de la meule autour de la plaque de verre, les températures s'avèrent systématiquement plus basses que celles des quelques tours suivants. Le fait que des températures plus faibles soient obtenues au 1^{er} tour peut provenir du contact meule / bande de thermocouple qui ne se réalise pas à proximité du verre. En effet lors de leur mise en place, les bandes de thermocouples peuvent déborder de 0,5 à 1 mm du bord de la plaque de verre, il en résulte une prise de température légèrement décalée par rapport au bord du verre et par conséquent une température mesurée plus faible. Une autre hypothèse est le fait que lors du 1^{er} tour la quantité de verre enlevée est différente des tours suivants car contrairement aux autres tours, le flan du verre est plat avant le 1^{er} tour.
- Après le 1^{er} tour, les relevés de température sont plutôt reproductibles (voir 2^e, 3^e, 4^e et 5^e tour).

- Au bout d'un certain nombre de tours, la température relevée peut devenir proche de la température ambiante (*Figure 3* à $t=140$ s). En fait cela provient de court-circuit entre les bandes de thermocouples. En effet, nous avons constaté que les bandes de cuivre après quelques tours de la meule autour de la plaque de verre instrumentée présentent des copeaux qui se mettent en contact électrique court-circuitant ainsi la prise de température du verre et entraînant une température proche de l'ambiante.

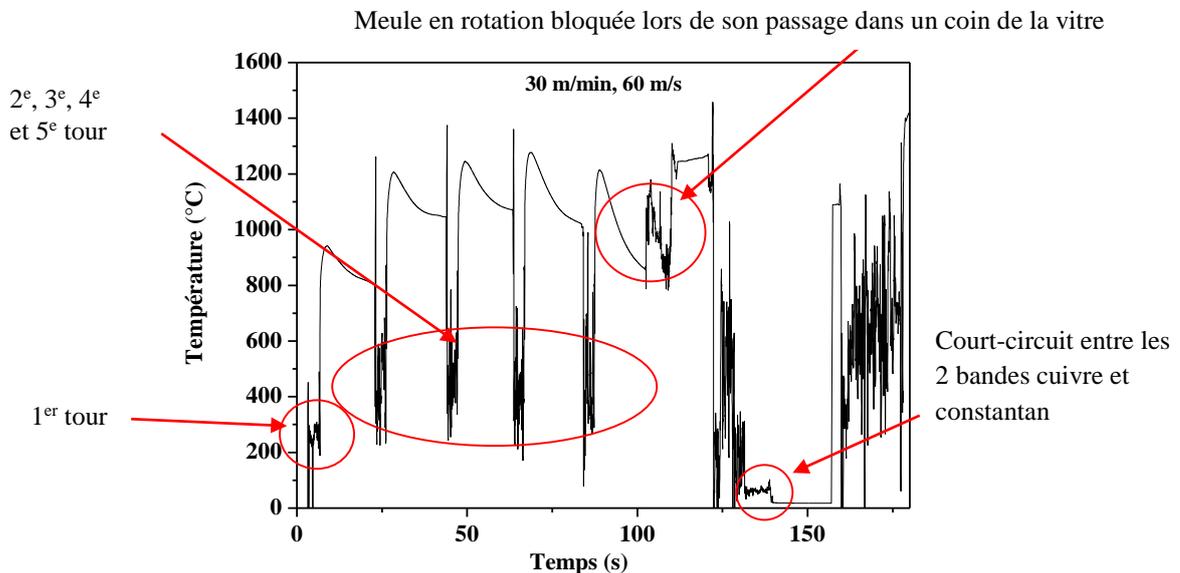


Figure 3 : Relevés de températures et effets du nombre de tours

4.2. Effet de paramètres de façonnage

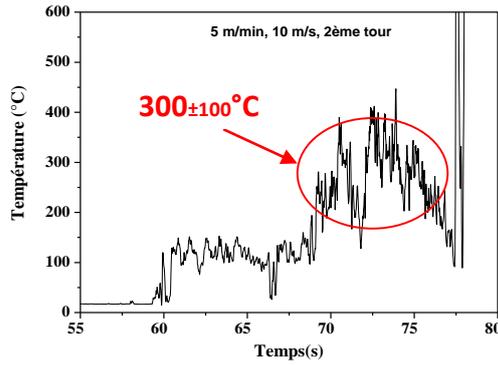
4.2.1. Effet de la vitesse de rotation de la meule

Nous présentons dans cette partie les résultats concernant l'effet sur la température du verre des vitesses de rotation et d'avance de la meule qui sont des paramètres facilement variables lors du procédé de meulage. La vitesse d'avance de la meule est de 5 m/min, les courbes représentées sont pour des vitesses de rotation de 10 et 40 m/s. Pour les autres vitesses de rotation de 50 et 60 m/s, les mesures de température du verre sont récapitulées dans le *Tableau I*. Nous avons considéré les températures sur le côté le plus long de la vitre. Le débit de refroidissement des jets d'eau impactants est de 70 - 90 L/min et la profondeur de passe lors du meulage est de 0,4 mm. La longueur de contact entre la meule et le verre est de 7,37 mm, calculée à partir du diamètre de la meule et la profondeur de passe.

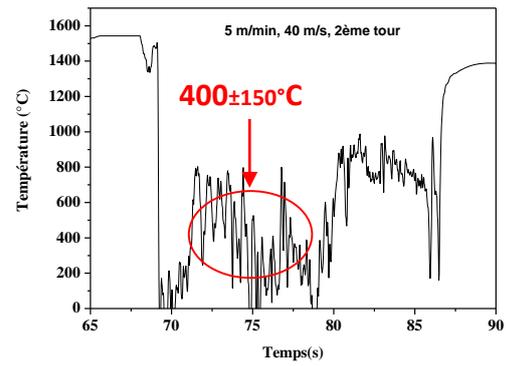
Pour une faible vitesse de rotation de la meule de 10 m/s, la température enregistrée est relativement faible, 300 ± 100 °C, et augmente avec la vitesse de rotation de la meule jusqu'à atteindre 600 ± 150 °C à une vitesse de 60 m/s (*Figure 4*).

4.2.2. Effet de la vitesse d'avance de la meule

L'effet de la vitesse d'avance sur la température à l'interface meule/verre est présenté pour deux vitesses de rotation de 40 et 60 m/s. La vitesse d'avance est de 5, 20 et 30 m/min. Les courbes de la *Figure 5* montrent que plus la vitesse d'avance diminue, plus la température du verre augmente. En effet, pour une vitesse de rotation de 60 m/s, les températures mesurées sont de



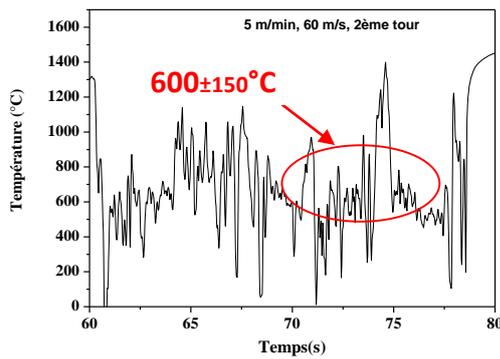
(a) 10 m/s



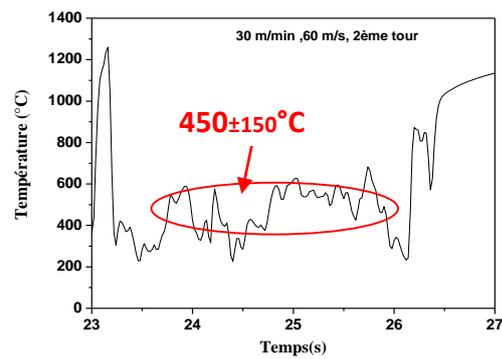
(b) 40 m/s

Figure 4: Température du verre lors du 2^{ème} tour pour différentes vitesses de rotation.

600 ± 150 °C et 450 ± 150 °C avec une vitesse d'avance respectivement de 5 et 30 m/min. Les incertitudes de mesure correspondent à 2 fois l'écart type des bruits de mesure. Ces bruits de mesure paraissent élevés mais ils sont liés à la technique de mesure utilisée car ils résultent de la formation et de la destruction successive des microcontacts thermoélectriques à la jonction des thermocouples avec la meule lors de sa rotation. On retrouve de tels bruits de mesure avec une technique du même type dans le cas du meulage de pièces métalliques [8].



a) 60m/s - 5m/min



(b) 60m/s - 30m/min

Figure 5: Relevés des températures pour différentes vitesses d'avance de la meule.

En faisant varier les vitesses de rotation et d'avance, il s'avère que la température du verre s'élève si la vitesse d'avance de la meule est diminuée ou si la vitesse de rotation de la meule est augmentée, ce qui s'explique dans les deux cas par une augmentation du frottement et donc du flux de chaleur généré. Une récapitulation des températures du verre constatées est présentée dans le *Tableau 1*.

Vitesse de rotation (m/s) ↓	Vitesse d'avance (m/min) →		
	5	20	30
10	300±100°C		
40	450±150°C	350±150°C	350±100°C
50	600±150°C		
60	600±150°C	500±150°C	450±150°C

Tableau 1: Effet de la vitesse d'avance et de rotation de la meule sur la température à l'interface meule/verre.

4.3. Etude numérique des biais de mesure engendré par la présence des bandes métalliques de thermocouple

4.3.1. Modèle numérique

L'instrumentation de la plaque de verre par des rubans métalliques induit des perturbations lors de la prise de température du verre. Le chiffrage des biais de mesure est indispensable et a été réalisé par un modèle numérique présenté dans la section suivante. Un modèle numérique 3D décrivant les transferts thermiques lors du processus du façonnage a été développé et a fait l'objet de simulation en utilisant le code éléments finis Comsol 4.3a. Ce modèle permet de prédire les champs de températures et les flux de chaleur sur chacun des éléments du dispositif expérimental. En raison de la symétrie de part et d'autre de la plaque de verre seulement une partie des éléments est modélisée. Ainsi, seul le côté instrumenté avec le constantan et sa bande adhésive ont été pris en compte. Afin de réduire la complexité du problème et donc le temps de calcul, une géométrie réduite obtenue après plusieurs essais de simulation est utilisée (Figure 6). Par ailleurs, la meule tournante est remplacée par un élément frottant fixe. Le contact entre la meule et le verre est supposé parfait. Le verre est soumis à des projections d'eau provenant du distributeur de refroidissement, par la suite un coefficient de transfert de chaleur convectif est appliqué sur sa partie supérieure ($h = 48,8 \text{ kW/m}^2.\text{K}$) Vader [9].

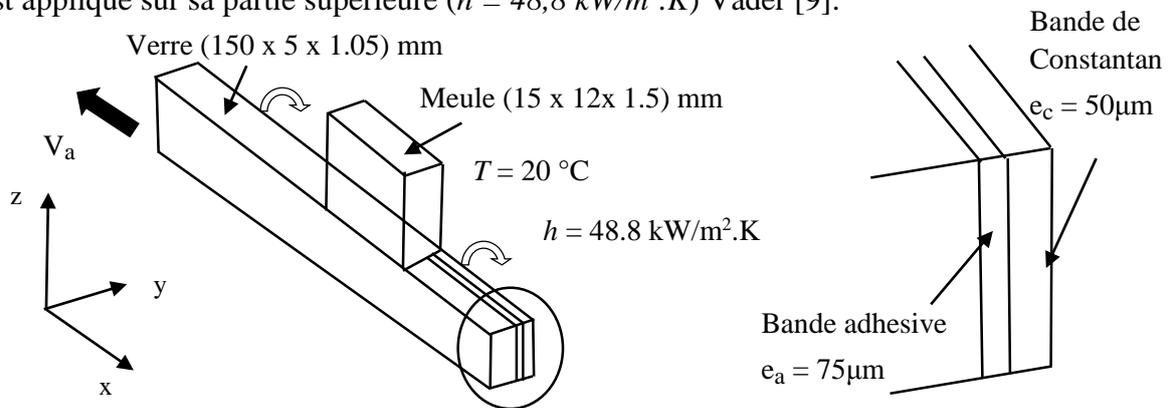


Figure 6: Modèle physique pour le calcul des biais de mesure.

La partie supérieure de la meule est supposée à $T = 20^\circ\text{C}$ (température ambiante). Toutes les autres parois sont adiabatiques. L'équation régissant le modèle physique est:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p V_a \nabla T = \nabla (\lambda \nabla T) \quad (1)$$

avec les conditions aux limites: $n(-\lambda \nabla T) = h(T - T_{ext})$ et la condition à l'interface meule/verre : $n(-\lambda \nabla T)_i = n(-\lambda \nabla T)_j + \varphi_g$ où h est le coefficient de transfert. Dans l'équation (1), T_{ext} est la température ambiante, V_a est la vitesse d'avance de la meule ($V_a = 5 \text{ m/min}$), φ_g est la densité de flux de chaleur générée à l'interface meule/verre ($\varphi_g = 2,5.10^6 \text{ W/m}^2$). La surface effective de contact entre la pièce et la meule est le produit de la longueur de contact et de l'épaisseur de la plaque de verre et est égale à $15,5 \text{ mm}^2$ ($L_c = 7,37 \text{ mm}$, $e = 2,1 \text{ mm}$).

4.3.2. Effet de l'épaisseur de la bande de constantan

Le Tableau 2 présente les résultats pour différentes épaisseurs de rubans de constantan avec une épaisseur d'adhésif de $75 \mu\text{m}$. La prise de température est réalisée au centre de la zone de contact meule-verre (point A correspondant à la température notée T_{verre}) et à l'interface constantan-meule (point B correspondant à la température $T_{constantan}$). Pour un modèle simple sans bande de thermocouple la température générée à l'interface augmente jusqu'à $T_0 = 453 \text{ }^\circ\text{C}$.

En plaçant la feuille de constantan avec du ruban adhésif double face, la température T_{verre} détectée tend à diminuer progressivement au fur et à mesure que le ruban devient plus épais. Le constat est le même pour la température du constantan. Pour les différentes épaisseurs de constantan, la différence entre la température du constantan et celle du verre augmente avec l'épaisseur du constantan.

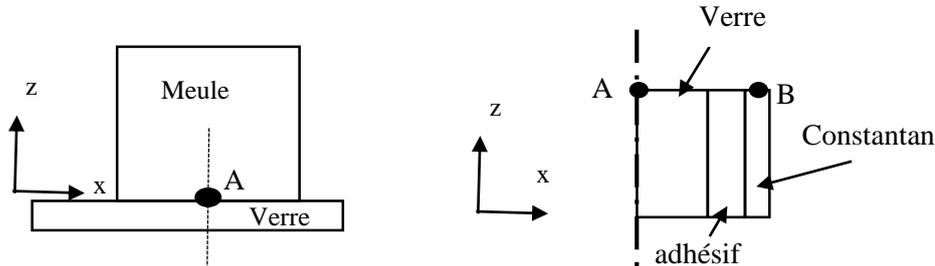


Figure 7: Point de mesure de la température.

Pour une couche mince de constantan (5 μm), l'écart entre les deux températures est d'environ 32° C. Elle augmente deux fois lorsque l'épaisseur augmente 50 fois. Ceci peut s'expliquer par le fait que plus la feuille métallique est fine, plus la température mesurée est proche de la température de la vitre en absence de toute instrumentation.

ép. Adhésif (μm)	ép. Constantan (μm)	T_{verre} (°C)	$T_{\text{constantan}}$ (°C)	$\delta = T_{\text{verre}} - T_{\text{constantan}}$, °C	$\delta = T_{\text{verre}} - 453$, °C	Erreur E_s (%)
0	0	453				
	5	447	415	32	38	8,4
75	30	437	406	31	47	10,4
	50	422	385	37	68	15
	250	340	280	60	173	38

Tableau 2: Effet de l'épaisseur des bandes de constantan sur la mesure de température du verre

L'erreur relative de mesure de température est définie par l'équation (2) avec $T_{\text{constantan}}$ la température mesurée par les bandes de thermocouple et T_0 la température du verre en l'absence d'instrumentation, c'est à dire $T_0 = 453^\circ\text{C}$. Cette erreur est supérieure à 38% avec la feuille la plus épaisse (250 μm) et est inférieure à 9% pour la plus fine (5 μm).

$$E_s = \frac{T_{\text{constantan}} - T_0}{T_0} \quad (2)$$

4.3.3. Effet de l'épaisseur de la bande adhésive

Dans cette section, les températures à la fois du constantan et du verre sont évaluées en fonction de l'épaisseur de la bande d'adhésive 3M utilisée. Pour les trois cas calculés, les valeurs de température sont présentées dans le *Tableau 3*. L'épaisseur de la feuille de constantan est constante dans les trois simulations et est égale à 50 μm . Il s'avère que les trois températures ne semblent pas être trop affectées par l'épaisseur du ruban adhésif, ceci peut s'expliquer par une conductivité thermique de la bande adhésive de type acrylique bien inférieure à celle du verre et du diamant fritté de la meule.

Epaisseur du Constantan (μm)	Epaisseur adhésif (μm)	T_{verre} ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{\text{constantan}}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta=T_{\text{verre}}-T_{\text{constantan}}$ ($^{\circ}\text{C}$)
50	0	406	369	37
50	37.5	414	378	36
50	75	422	385	37

Tableau 3: Effet de l'épaisseur de l'adhésif sur la température mesurée

5. Conclusion

La mesure de la température du verre au cours de son meulage n'est pas simple. Dans nos travaux, une méthode originale de mesure par des bandes de thermocouples de type T et d'épaisseur 50 μm placées de part et d'autre de la vitre a été mise en place permettant de relever des élévations importantes de température du verre à l'interface verre/meule. Avec des épaisseurs de bandes de thermocouples de l'ordre de 50 μm , on a pu constater une bonne tenue mécanique de celles-ci notamment lors du passage de la meule qui exerce une certaine pression, ce qui n'a pas été le cas pour des épaisseurs plus faibles des bandes métalliques. Les mesures réalisées montrent que la température du verre est sensible aux conditions opératoires du procédé de meulage et tout particulièrement à la vitesse d'avance de la meule et dans un degré moindre à sa vitesse de rotation. Toute instrumentation thermique perturbe plus ou moins les températures que l'on souhaite mesurer. Dans notre cas, les bandes sont assez épaisses et il s'avère important d'étudier les biais de mesure. La simulation numérique réalisée a permis de montrer que ces biais de mesure augmentent avec l'épaisseur de la feuille de constantan. Pour des mesures avec des épaisseurs de bandes de thermocouple inférieures ou égales à 50 μm , les biais engendrés par la présence des bandes n'excèdent pas 68 $^{\circ}\text{C}$, ce qui reste inférieure à la dispersion constatée (environ 150 $^{\circ}\text{C}$) lors des mesures de température. La dispersion constatée est élevée en raison des microcontacts thermoélectriques qui se font et se défont à une fréquence très élevée lors du frottement de la meule sur les bandes de thermocouples.

6. Références

- [1] A. Brosse, P. Naisson, H. Hamdi, J.M. Bergheau, Temperature measurement and heat flux characterization in grinding using thermography, *Journal of Material Processing Technology*, 46, (2008), 2086-2093.
- [2] A.D. Batako, W.B. Rowe, M.N. Morgan, Temperature measurement in hig efficiency deep grinding, *Journal of Machine Tools & Manufacture*, (2005), 45, 1231-1245.
- [3] J. Peklenik., Ermittung von geometrishen und physikalischen kenngrossen fur die grund des schleifens, *Dissertation*, (1957).
- [4] A.Y.C Nee., A.O. Tay, On the measurement of surface grinding temperature, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 21, 134, (1981), 279-291.
- [5] Rowe W.B., Black S.C.E., Mills B., Temperature control in CBN grinding, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 12, (1996), 387-392.
- [6] A. Lefebvre, P. Vieville, P. Lipinski, C. Lescalier, Numerical analysis of grinding temperature measurement by the foil/workpiece thermocouple method, *Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 1716-1726, (2006).
- [7] T. Obikawa, H. Takahara, T. Shirakashi, Energy flowing into workpiece in surface grinding based on 3-dimensional temperature analysis, discussion on temperature distribution in workpiece measured by hole method, *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 130-11, 29-34, (1996).
- [8] A. Lefebvre, F. Lanzetta, P. Lipinski, A.A Torrance, Measurement of grinding temperatures using a foil/workpiece thermocouple, *Machine Tools & Manufacture*, 58, 1-10, (2012).
- [9] D. Vader, Convective boiling heat transfer form a heated surface to an imping planer jet, PhD Purdue University (1988).