

Influence des échanges radiatifs sur l'étalement d'une goutte de verre

Maxime CRESSIN^{1*}, Philippe MOREAU¹, Fabien BÉCHET², Hakim NACEUR²,
Dominique LOCHEGNIES¹, Nadir BOUKHARI³

¹ Univ. Polytechnique Hauts-de-France, CNRS UMR 8201-LAMIH, F-59313 Valenciennes, France

² INSA Hauts-de-France, CNRS UMR 8201-LAMIH, F-59313 Valenciennes, France

³ SAVERGLASS, 3 place de la gare, 60960 Feuquières, France

* (auteur correspondant : maxime.cressin@uphf.fr)

Résumé - L'influence des échanges thermiques lors de la chute d'une goutte de verre à haute température sur une plaque d'acier est étudiée. Une analyse de sensibilité du modèle de rayonnement sur la distribution de température et sur la géométrie déformée de la goutte de verre est réalisée. Les résultats montrent que les effets radiatifs jouent un rôle important entraînant une variation de température maximale de 19% et une différence dans le diamètre de la goutte de verre étalée de 5% selon les modèles choisis.

Mots-clés : Transfert thermique ; formage du verre ; coefficient d'échange ; rayonnement ; éléments finis.

Abstract - The influence of heat exchanges during the fall of a drop of glass at high temperature on a steel plate is studied. A sensitivity analysis of the radiation model on the temperature distribution and on the deformed geometry of the glass drop is performed. The results show that radiative effects play an important role, causing maximal temperature variation of 19% and a difference in the diameter of the spread glass drop of 5% depending on the chosen models.

Keywords: Heat transfer; glass forming; exchange coefficients; radiation; finite element.

1. Introduction

Le verre est un matériau semi-transparent dont le comportement mécanique dépend fortement de la température. Dans le cas du formage de bouteilles de verre par le procédé soufflé-soufflé, la température du verre varie de 1100 °C (au début du cueillage de paraison) jusqu'à 600°C (sortie de l'article formé). Il est donc nécessaire, pour simuler efficacement ces opérations de mise en forme du verre, de quantifier avec précision les échanges thermiques qui affectent directement la distribution de la température de l'article de verre. Ces échanges thermiques sont liés à différents phénomènes : la conduction, la convection verre/air, le rayonnement du verre. Le coefficient d'échange thermique et le modèle de rayonnement influent fortement sur la distribution de température [1, 2], ainsi que sur la géométrie finale de l'article formé. Cependant, la prise en compte du rayonnement dans la simulation numérique d'un milieu semi-transparent est complexe et engendre des temps de calcul très importants pour la résolution de l'équation de transfert radiatif (ETR) la rendant incompatible avec les besoins industriels. De plus, il est nécessaire de déterminer les propriétés optiques spécifiques du verre étudié à l'aide d'essais expérimentaux. En effet, des propriétés telles que l'indice de réfraction du verre et le coefficient d'absorption sont dépendants de la composition du verre et de sa teinte [3]. Une étude de comparaison numérique et expérimentale a déjà été menée [4] permettant de montrer l'importance d'utiliser un modèle non-isotherme et l'influence de la température initiale du verre sur la géométrie finale déformée. Dans ce travail, la chute d'une paraison de verre sur une plaque

d'acier est modélisée dans le but d'étudier l'influence des paramètres d'échange thermique et des modèles de rayonnement sur la variation de température ainsi que sur la géométrie déformée de la paraison lors de son étalement sur la surface d'acier. Ces travaux ont permis d'identifier les phénomènes d'échange thermique à prendre en compte dans le procédé soufflé-soufflé.

2. Modélisation numérique de l'étalement d'une goutte de verre sur plan

2.1. Description du problème

Pour des raisons de simplicité, la modélisation de la chute de la paraison de verre est faite en adoptant l'hypothèse 2D axisymétrique, comme le montre la figure 1. La forme de la paraison est simplifiée et ses dimensions sont en accord avec des observations expérimentales réalisées par Saverglass lors de la chute de paraison au début du formage soufflé-soufflé. A l'instant initial, la température de la paraison est uniforme et correspond à $1140^{\circ}C$, sa vitesse de $v_0 = 7,3m/s$ au moment de son impact avec une plaque d'acier horizontale dont la température est fixée à $480^{\circ}C$.

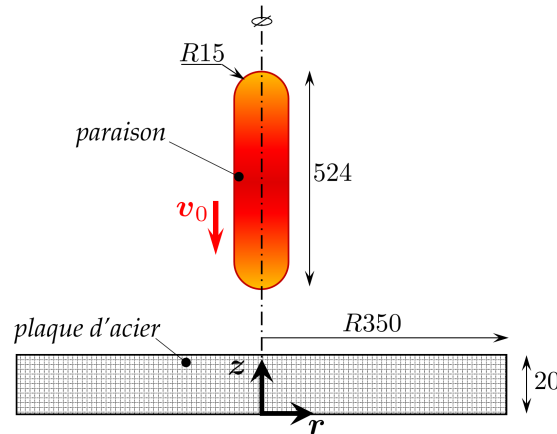


Figure 1 : Chute de paraison : données géométriques (en mm)

La plaque est considérée encastree et une condition de convection libre est imposée sur la surface libre de la paraison ainsi que celle de la plaque avec un coefficient d'échange $\alpha = 25 Wm^{-2}K^{-1}$.

2.2. Paramètres matériau

Le verre sodocalcique est considéré comme un fluide newtonien, de masse volumique $\rho = 2400 kg/m^3$, de conductivité thermique k_v variable en fonction de la température, de capacité thermique massique c_p variable en fonction de la température et de coefficient de dilatation $9 \times 10^{-6} K^{-1}$ [6]. Les valeurs numériques non décrites sont fournies par Saverglass. La dépendance de la viscosité à la température est représentée par le modèle de Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) [7].

$$\log_{10}(\eta) = A + \frac{B}{T - T_0} \quad (1)$$

avec η la viscosité, T la température, A , B et T_0 des paramètres déterminés à partir des mesures expérimentales par Saverglass.

L'acier X2CrNi12 est considéré comme élastique. Il est défini à l'aide d'une masse volumique, d'un module d'Young, d'un coefficient de Poisson 0,3 et d'une conductivité ther-

mique ainsi qu'une capacité thermique massique dépendants de la température. Les valeurs numériques non décrites sont fournis pas Saverglass.

2.3. Modèle thermomécanique

La résolution du problème thermomécanique d'impact de la paraison et son étalement sur la plaque d'acier, nécessite la résolution de l'équation de conservation de masse, des équations de Naviers-Stokes et de l'équation d'énergie. Les équations (2), (3) et (4) sont relatives à la paraison seule.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\rho \vec{u} \otimes \vec{u}] = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \bar{\bar{\tau}} + \rho \vec{f} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot ((\rho e + p)\vec{u}) = \vec{\nabla} \cdot (\bar{\bar{\tau}} \cdot \vec{u}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{u} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q} + s \quad (4)$$

avec $\vec{u} = \{u_r, u_z\}$ le vecteur vitesse du verre, p la pression, e l'énergie, $\bar{\bar{\tau}}$ le tenseur des contraintes visqueuses, \vec{q} le flux de chaleur dû à la conduction thermique, \vec{f} les forces massiques extérieur et s un terme de source d'énergie.

Le domaine D de la paraison (figure 1) est défini tel que $\vec{r} = (r, z) \in D$ et la surface du verre est noté ∂D . Le domaine D_t et la surface ∂D_t représentent respectivement le domaine occupé par le verre et la surface du verre au cours du temps t tel que $D_t = D \times \{0 < t < t_{max}\}$.

L'équation d'énergie s'écrit :

$$c_p \rho \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \vec{\nabla}_{\vec{r}} \cdot (k_v \vec{\nabla}_{\vec{r}} T(\vec{r}, t)) - \vec{\nabla}_{\vec{r}} \cdot \vec{q}_{rad}(\vec{r}, T) \quad (5)$$

avec $T(\vec{r}, t)$ la température qui dépend de la position \vec{r} et du temps t , $\vec{\nabla}_{\vec{r}}$ l'opérateur de gradient dans le système de coordonnées cylindriques (r, z) et \vec{q}_{rad} représente le flux radiatif [2].

Dans cette étude, le flux radiatif \vec{q}_{rad} est négligé dans l'équation (5) car il est indisponible dans le logiciel Polyflow. Cela permet de réduire cette équation à la forme simplifiée :

$$c_p \rho \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \vec{\nabla}_{\vec{r}} \cdot (k_v \vec{\nabla}_{\vec{r}} T(\vec{r}, t)) \quad (6)$$

Les conditions aux limites thermiques de l'équation d'énergie (6) s'écrivent :

$$k_v \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial n} = \alpha (T(\vec{r}, t) - T_\infty) + \vec{n} \cdot \vec{q}_{opaque}(\vec{r}, T) \quad (7)$$

$$k_v \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial n} = 0, \quad r = 0 \quad (8)$$

avec \vec{n} le vecteur normal extérieur à la limite D_t du domaine du verre. Le premier terme du second membre de l'équation (7) représente la convection avec l'air ambiant à la température

T_∞ et α est le coefficient de convection. Le second terme représente le flux radiatif sur la surface du verre dans la région de longueur d'onde opaque. Dans notre cas, ce flux est défini par la loi de Stefan-Blotzmann tel que :

$$\vec{n} \cdot \vec{q}_{\text{opaque}}(\vec{r}, T) = \vec{n} \cdot \vec{q}_{SB}(\vec{r}, T) = \gamma\sigma \left[(T(\vec{r}, t))^4 - (T^\infty)^4 \right], \quad (\vec{r}, t) \in \partial D_t \quad (9)$$

avec $\vec{n} \cdot \vec{q}_{SB}$ le flux radiatif de la loi de Stefan-Boltzmann, γ l'émissivité spectrale de la surface et $\sigma = 5.6704 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ la constante de Stefan-Boltzmann.

Les conditions aux limites de l'équation d'énergie se résument à :

- $k_v \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial n} = \alpha (T(\vec{r}, t) - T_\infty) + \gamma\sigma \left[(T(\vec{r}, t))^4 - (T^\infty)^4 \right], \quad (\vec{r}, t) \in \partial D_t$
- Condition de type contact collant, faite par une méthode de pénalité [5] avec un coefficient d'échange thermique à l'interface de contact $h_c = 2295 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ [1].

Cette valeur a été défini en moyennant les valeurs obtenues par Grégoire [1] du fait de l'impossibilité de définir sous Polyflow un coefficient d'échange thermique à l'interface de contact variable en fonction du temps de contact lorsque la température de la plaque n'est pas constante. En raison des déformations importantes du verre, un remaillage adaptatif est utilisé avec une taille de maille de 5mm . De plus, un raffinement de maillage au niveau des bords du domaine du verre est imposé avec une consigne de taille de maille de 1mm à proximité des bords à 5mm (voir figure 3). Le maillage de la paraison est réalisé avec des éléments triangulaires quadratiques T6, celui de la plaque est réalisé avec des éléments quadrangulaires linéaires Q4.

La résolution numérique de ce problème thermomécanique est faite par une technique de couplage forte, en utilisant la méthode des éléments finis en formulation eulérienne. Les équations de conservation de masse, de Navier-Stokes ainsi que l'équation d'énergie sont résolues par un schéma implicite. L'équation dynamique régissant la cinématique de déformation de la paraison est résolue par le schéma d'Euler implicite. La durée de simulation totale est de 60s , la condition CFL de valeur 10^{-3} est imposée pour garantir la stabilité du schéma de résolution. Le logiciel ANSYS Polyflow a été utilisé pour la modélisation de ce problème.

2.4. Analyse de sensibilité des modèles de rayonnement

Il s'agit d'étudier l'influence du modèle de rayonnement en simulant un modèle avec une conductivité effective [8] pour représenter le rayonnement noté *modèle 1*, un modèle avec le rayonnement de surface noté *modèle 2* et enfin un modèle combinant le rayonnement de surface et la conductivité effective noté *modèle 3*. Les données numériques nécessaires à la prise en compte du rayonnement sont fournies par Saverglass.

Dans le cas de la conductivité effective, le flux radiatif \vec{q}_{rad} est approximé dans l'équation (5) par une conductivité dite effective et noté k_e tel que :

$$c_p \rho \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \vec{\nabla}_{\vec{r}} \cdot (k_e \vec{\nabla}_{\vec{r}} T(\vec{r}, t)) \quad (10)$$

Ici les valeurs de k_e sont fonction de la température et ont été déterminées expérimentalement par Saverglass.

3. Résultats et discussions

La résolution numérique est faite par un schéma d'intégration implicite avec une condition CFL de 10^{-3} et un pas de temps variable avec $10^{-5} \leq \Delta t \leq 0.1s$. Un remaillage adaptatif est effectué tous les 4 pas de temps afin de réduire les temps.

La figure 2 montre les déformées successives au cours de l'impact de la paraison avec la plaque d'acier. On peut remarquer qu'au moment de l'impact de la paraison avec la plaque d'acier, celle-ci prend une forme elliptique. Ensuite, sous l'effet visqueux du verre, la goutte encore très chaude commence à s'étaler sur la plaque avec une déformation très lente du profil de la déformée qui dure jusqu'à 60s.

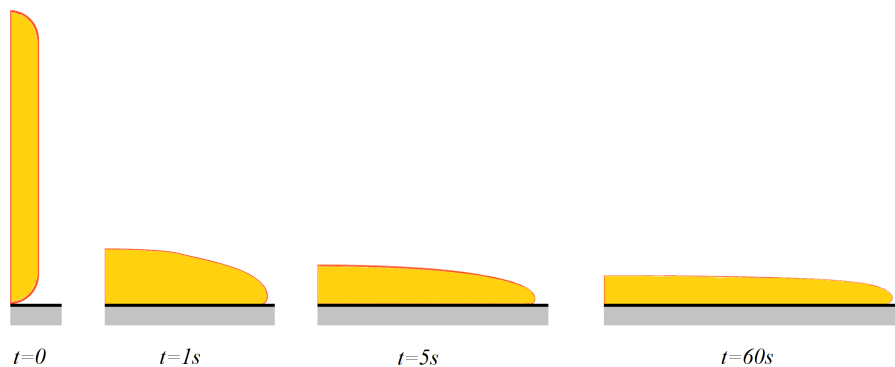


Figure 2 : Déformées de la paraison de verre au cours du temps

Pour l'étude de sensibilités, les trois modèles numériques ont été simulés avec les mêmes paramètres numériques. Le calcul avec le *modèle 1* a été effectué en 785 pas nécessitant un temps CPU de 10607 s et un nombre d'éléments finis total après raffinement de 6868 éléments triangulaires quadratiques T6. Le calcul avec le *modèle 2* quant à lui, a nécessité plus de pas de temps avec 788 pas et un temps CPU plus important 11152 s. Le raffinement de maillage a généré 6949 éléments T6. Le calcul avec le *modèle 3* est le plus coûteux des trois, puisqu'il a consommé un temps CPU de 11373 s avec un maillage sensiblement identique avec 6571 éléments T6.

Un exemple de raffinement de maillage en fin de calcul est donné sur la figure 3, où l'on remarque la taille de maille de 1mm au voisinage du contour de la goutte déformée. Ceci a permis d'une part de vérifier les conditions de contact avec la plaque et d'autre part assurer un bon calcul des flux d'échange sur les différents parois de la goutte.

3.1. Analyse de sensibilité thermique

Dans un premier temps, nous étudions l'influence des paramètres sur la variation de température dans la goutte. Pour cela, différentes sections de coupe ont été faites à des abscisses prédéfinies, comme le montre la figure 3. La position $z=0$ correspond au contact verre/acier.

La figure 4 montre les variations de température à travers l'épaisseur de la goutte de la section 1. On peut observer que le modèle 1 (conductivité effective) présente une température plus élevée sur la surface libre de la goutte, ce qui est normal puisqu'il ne prend pas en compte le rayonnement en surface. Le modèle 2 (rayonnement en surface seul) quant à lui présente une température plus faible au niveau des parois de la goutte puisqu'il ne considère le rayonnement que dans le domaine opaque alors que le verre est un matériau semi-transparent. Le modèle 3 (basé sur la conductivité effective et le rayonnement de surface), permet de corriger les fai-

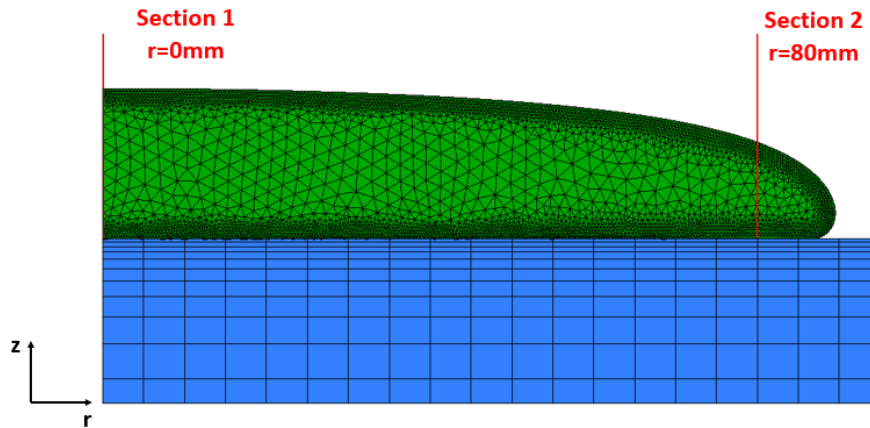


Figure 3 : Raffinement de maillage éléments finis à l'état déformé de la goutte

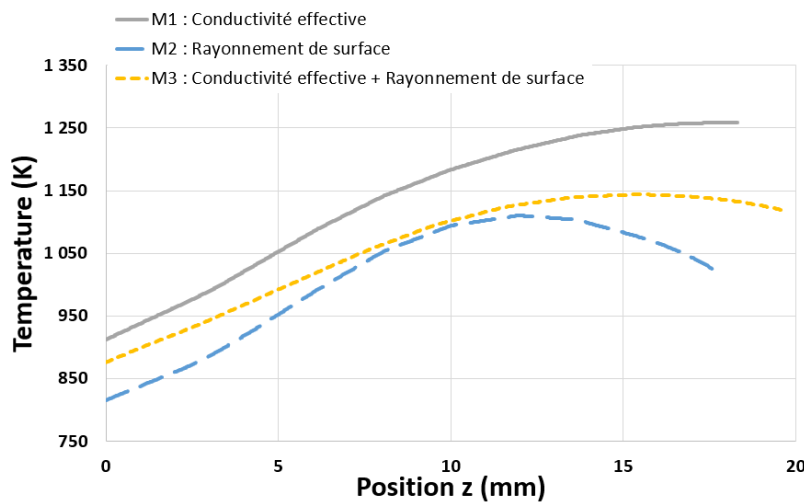


Figure 4 : Variation de la température à l'instant $t = 60s$ dans la section 1

blesses des deux modèles précédents. Cependant, il n'est pas possible à ce jour d'identifier le modèle le plus pertinent car aucun résultat de références n'est défini. Ces résultats pourraient provenir d'essais expérimentaux ou d'un calcul incluant la divergence du flux radiatif $\vec{\nabla}_{\vec{r}} \cdot \vec{q}_{rad}(\vec{r}, T)$ de l'équation (5) calculé à partir de l'équation de transfert radiatif (ETR). Cette résolution numérique complète n'est pas disponible sur Ansys Polyflow actuellement.

La comparaison de la variation de température au niveau de la section 2 (figure 5), confirme la même tendance précédente, avec des effets accentués et donc plus de différence du modèle 1. Ces différences sont dues à l'absence de rayonnement en surface du modèle 1. En effet, la section 2 se trouve à l'extrémité la plus avancée du verre, c-a-d à l'endroit où les points matériels de surface ont subi un maximum d'échanges radiatifs durant la phase d'étalement de la goutte à cause des effets visqueux.

3.2. Étude de sensibilité géométrique

La figure 6 montre les courbes d'évolution du diamètre maximal de la goutte étalée au cours du temps.

On peut observer que le modèle 1 basé sur l'utilisation de la conductivité effective seule génère une goutte de verre d'un diamètre maximal d'environ $179mm$. Avec l'absence d'échanges

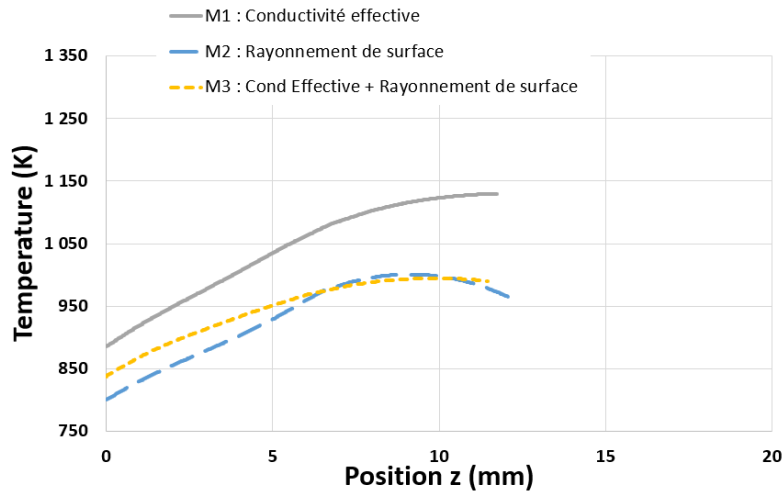


Figure 5 : Variation de la température à l'instant $t = 60s$ dans la section 2

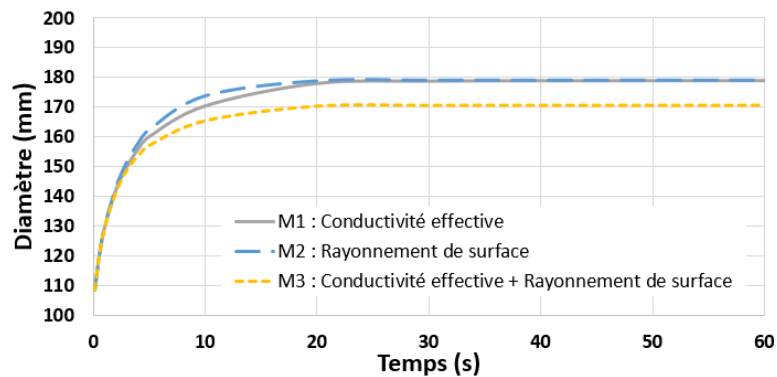


Figure 6 : Variation du diamètre maximal de la déformée (selon \vec{r}) au cours du temps

radiatifs en surface, la température de la goutte de verre reste élevée et permet un étalement plus important. Le modèle 2 basé sur le rayonnement de surface seul, génère une taille de goutte identique avec un diamètre de près de $179mm$. Le modèle 3 combinant une conductivité effective et un rayonnement de surface présente le diamètre de goutte de plus faible, d'environ $170mm$. Ces résultats sont en accord avec les observations réalisées au niveau des températures. Avec des échanges thermiques plus faible (conductivité effective), les températures sont plus élevées, ainsi, la goutte de verre s'étale plus et donne un diamètre maximal de la déformée plus important.

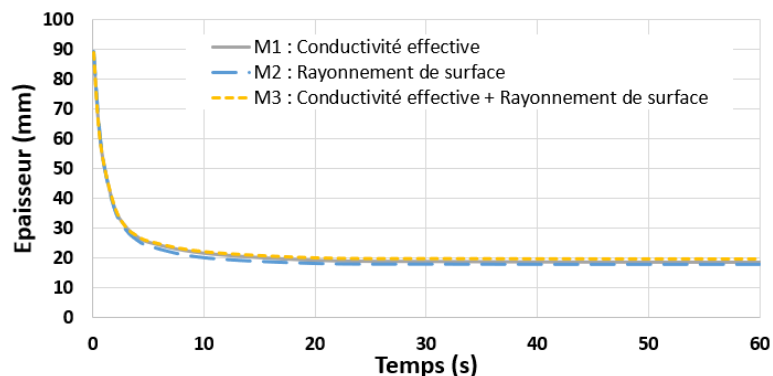


Figure 7 : Variation de l'épaisseur maximale de la déformée (selon \vec{z}) au cours du temps

La comparaison de la variation d'épaisseur de la goutte de verre en son centre montre que le modèle 3 combinant une conductivité effective et un rayonnement de surface, donne une épaisseur de verre la plus grande d'environ 40mm. Les deux autres modèles donnent une prédiction d'épaisseur légèrement plus faible d'environ 38mm qui est encore due à une température plus élevée dans le verre qui conduit à un étalement plus important.

4. Conclusion

Cette investigation a permis d'étudier l'impact du modèle de rayonnement sur le comportement du verre à travers une application simple de chute d'une paraison. Trois modèles numériques simples ont été étudiés : un premier modèle basé sur l'utilisation de la conductivité effective, un second modèle dans lequel le rayonnement de surface est adopté et un troisième modèle combinant les deux précédents. Cette étude a montré que l'utilisation d'une conductivité effective combiné à un modèle de rayonnement de surface, semble être le modèle le plus représentatif. En effet, il permet de prendre en compte à la fois le rayonnement de surface mais également une estimation des phénomènes radiatifs au sein du verre à l'aide d'une conductivité effective. De plus, cette méthode a déjà été utilisée par César de Sà dans la simulation de formage de bouteille en verre par le procédé soufflé-soufflé [8]. Les temps de calculs raisonnables sont compatibles avec une utilisation en milieu industriel. Une prochaine étude, incluant des résultats numériques d'une simulation prenant en compte l'ETR et des résultats expérimentaux, permettra de valider ou non les modèles précédents.

Références

- [1] S. Grégoire, Identification du coefficient de transfert de chaleur à l'interface verre/outils de formage et prise en compte dans la modélisation par Eléments Finis des procédés de formage de verre, Thèse de l'Université Polytechnique des Hauts de France, 2006.
- [2] K. Agboka, Développement d'un modèle thermomécanique axisymétrique en milieu semi-transparent avec transfert radiatif : application au fluage et à la trempe des verres, Thèse de l'Université Polytechnique des Hauts de France, 2018.
- [3] J. Barton, C. Guillemet, *Le verre - Science et technologie*, EDP Sciences (2005).
- [4] A. Biosca, Numerical and experimental study of blow and blow for perfume bottles to predict glass thickness and blank mold influence, *International Journal of Applied Glass Science* 10 (4) (2019) 569-583.
- [5] ANSYS Inc., ANSYS Polyflow User's Guide, 2017.
- [6] http://www.verreonline.fr/v_plat/prop_therm1.php (site consulté le 28/09/2020).
- [7] G. Fulcher, Analysis of recent measurements of the viscosity of glasses, *Journal of the American Ceramic Society* 8 (1925) 789-794.
- [8] J. César de Sà, Numerical modelling of glass forming processes, *Engineering Computations* 3 (5) (1986) 266-275.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à l'entreprise Saverglass, qui finance ces travaux de recherches et fournit les données expérimentales permettant d'alimenter les modèles numériques. Les auteurs souhaitent également remercier le Centre National de la Recherche Scientifique, l'institut Carnot ARTS et la région Hauts-de-France qui contribuent à ces travaux de recherche.