

Etude expérimentale des champs de températures dans un écoulement d'élastomère – Influence de la géométrie d'écoulement

Julien LAUNAY*, Nadine ALLANIC, Pierre MOUSSEAU, Rémi DETERRE, Christophe PLOT

Université - IUT de Nantes, CNRS, GEPEA, UMR 6144, IUT de Nantes, 2 avenue du Professeur Jean Rouxel, 44475 Carquefou Cedex

*(auteur correspondant : julien.launay@univ-nantes.fr)

Résumé - Dans cette étude, un dispositif expérimental équipé d'un capteur de température intrusif est exploité pour mesurer le champ de température en sortie d'un canal cylindrique de rayon 10 mm. Une première analyse expérimentale est menée pour mesurer l'impact thermique d'un changement de direction et d'une division du flux de matière de l'écoulement. Des essais expérimentaux sont ensuite réalisés en intégrant dans un canal droit un élément de forme double elliptique nommé dissipateur. L'ajout de cet élément est à l'origine d'une redistribution des flux de matière permettant d'homogénéiser le champ de température dans l'écoulement.

Nomenclature

D	diamètre, mm	R	rayon d'écoulement, m
L	longueur d'écoulement, m	t	temps, s
N	vitesse de rotation, tr/min	T	température, $^{\circ}C$
P	pression, Pa	z	coordonnée axiale, m
ΔP	perte de charges, Pa	<i>Indices et exposants</i>	
Q	débit volumique, $m^3.s^{-1}$	<i>ext</i>	extérieur
r	rayon polaire, m	<i>int</i>	intérieur

1. Introduction

Dans l'industrie des caoutchoucs de nombreux industriels rajoutent, pour équilibrer leurs moules d'injection, un système destiné à redistribuer les flux de matière [1,2]. L'ajout de bifurcation et de changements de direction successifs permet de répartir la matière cisailée, et donc échauffée de façon plus équilibrée entre les canaux d'alimentation. Toutefois, dans ce type d'approche, le temps de séjour de la matière est considérablement augmenté ce qui n'est pas sans conséquence sur l'avancement cinétique de la matière. L'obtention d'une homogénéité cinétique passe en premier lieu par une maîtrise de l'homogénéité thermique [2,3]. En effet, la dissipation visqueuse intervenant dans les canaux d'alimentation des moules peut être à l'origine d'un démarrage prématuré de la réaction de vulcanisation. Dans un écoulement rectiligne, la matière située en paroi est la plus chaude et présente également les temps de séjour les plus élevés. De ce fait, sa réaction de vulcanisation démarrera en premier. Il serait alors pertinent d'introduire au sein du canal un élément perturbateur, certainement de géométrie complexe, permettant de redistribuer la matière située à la paroi au centre de l'écoulement.

L'objectif de ce travail est de mettre en place les outils expérimentaux permettant de prédire la capacité d'une géométrie à homogénéiser thermiquement et donc cinétiquement un mélange élastomère. Pour ce faire, un dispositif expérimental original permettant de mesurer de manière intrusive un profil de température en sortie d'un canal d'écoulement cylindrique a été mis au point. Ce dispositif doit reproduire les géométries type utilisées dans la conception

des canaux d'alimentation des moules (coude, diviseur de flux, changement de diamètre, etc.) Nous présenterons ici les résultats expérimentaux obtenus en comparant le profil de températures mesuré en sortie d'un canal cylindrique droit avec le profil de températures mesuré en sortie après un changement de direction (géométrie en coude) et après une division du flux de matière (géométrie en té). Enfin, des résultats sont également montrés dans le cas d'une géométrie particulière appelée dissipateur qui concentre les effets des deux géométries précédentes.

2. Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental permettant l'étude d'un écoulement de polymère en sortie d'une machine de mise en forme a été développé. Sa conception originale laisse une grande flexibilité sur la géométrie d'écoulements. Il permet entre autres de considérer un écoulement avec des variations de diamètre ou des changements de direction. Pour moduler la géométrie d'écoulement, deux types d'assemblage « canal droit » et « Té », décrites ci-dessous, sont possibles.

2.1. Canal droit instrumenté

La Figure 1 donne une vue d'ensemble du dispositif expérimental. Il est constitué d'un canal cylindrique de longueur $L = 300$ mm, de diamètre extérieur $D_{\text{ext}} = 50$ mm et de diamètre intérieur $D_{\text{int}} = 10$ mm. Le canal est scindé en trois parties (Figure 1a). Les éléments d'entrée et de sortie de longueur 80 mm sont fixes alors que l'élément central est modulaire. La fixation à la machine de mise en forme est réalisée par l'intermédiaire de deux bouchons de fixation et de quatre tirants (Figure 1b).

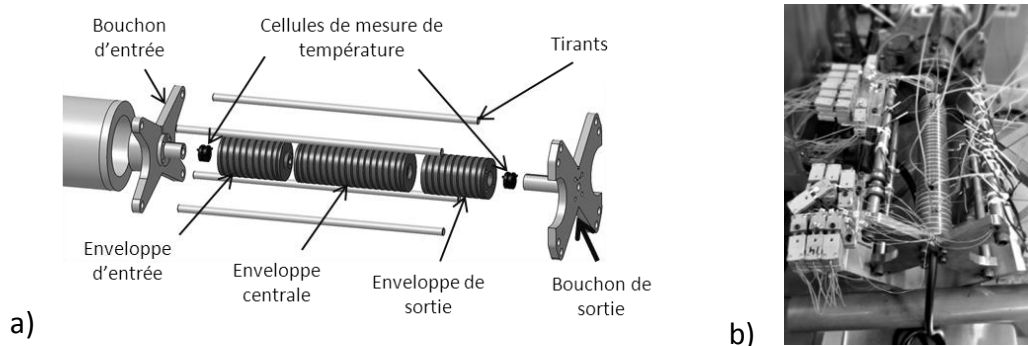


Figure 1 : Dispositif expérimental en assemblage canal droit
(a) vue d'ensemble (b) montage sur extrudeuse

En plus de leur rôle de fixation du dispositif, les bouchons permettent de mettre en position au cœur de l'écoulement (Figure 1a), une cellule de mesure de température intrusive (CMT). Ce capteur de température, présenté sur la Figure 2a, comporte 25 thermocouples de diamètre $50\mu\text{m}$ [3,4]. Les thermocouples sont répartis uniformément sur deux diamètres perpendiculaires à l'écoulement (Figure 2b).

Des capteurs de pression de 2,5 mm de diamètre sont placés en entrée et sortie de l'écoulement afin de mesurer la perte de charge ΔP . Le maintien en température du dispositif est assuré par des fils chauffants de 2 mm de diamètre, fixés par matage au fond d'une rainure hélicoïdale d'un pas de 8 mm, et délivrant une puissance totale de 750W. Afin d'obtenir une régulation en température optimale, cinq zones de chauffage indépendantes sont réparties sur les trois éléments du canal. Les thermocouples de régulation sont introduits à 4,5 mm de la paroi extérieure. Une balance placée en sortie du dispositif permet de déterminer le débit

d'écoulement (Q). L'ensemble de l'instrumentation mise en place sur le canal est relié à un système d'acquisition de données. Dans notre étude, le dispositif est adapté sur une extrudeuse caoutchouc industrielle de marque Colmec (Figure 1b). Dans cette étude purement expérimentale et afin d'éviter des perturbations supplémentaires, seule la CMT de sortie est introduite dans le dispositif.

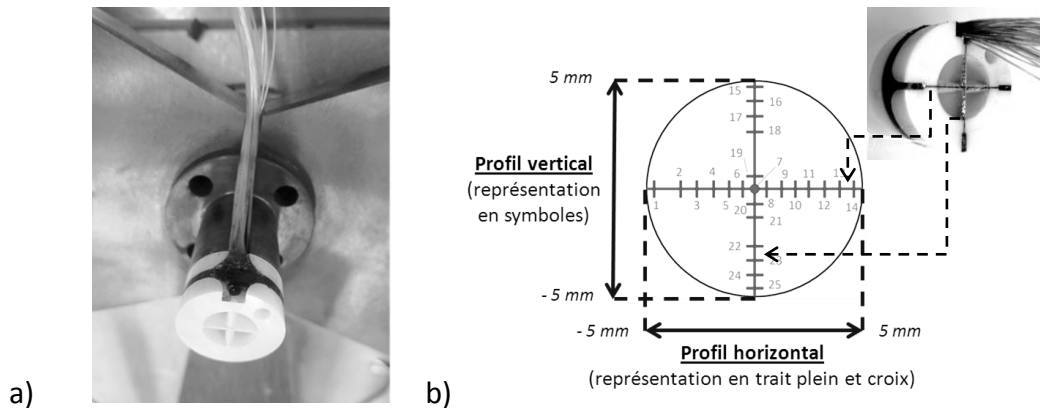


Figure 2 : Cellule de mesure intrusive (a) CMT introduite dans un bouchon (b) instrumentation

2.2. Assemblage en T

L'assemblage en T est représenté sur la Figure 3a et nécessite l'utilisation d'une seconde enveloppe de sortie. L'écoulement est soit scindé en deux dans la configuration « diviseur » (Figure 3b) soit dévié de 90° dans la configuration « coude à 90° » (Figure 3c). Pour cette dernière configuration, un bouchon spécifique obstruant une des deux sorties est mis en place. L'assemblage en T est plus complexe, il possède dix zones de chauffage indépendantes pour assurer la régulation en paroi. De par sa forme, l'enveloppe centrale est la plus difficile à réguler en température.

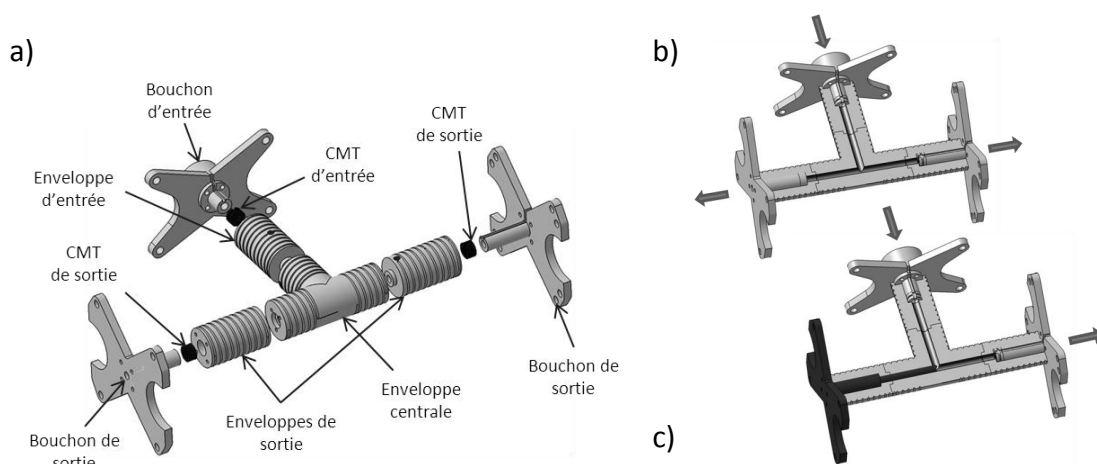


Figure 3 : Assemblage en T du dispositif expérimental
(a) vue d'ensemble (b) configuration diviseur (c) configuration coude à 90°

3. Résultats expérimentaux

Le matériau utilisé pour les expérimentations est un élastomère de type EPDM [3]. Les essais expérimentaux sont réalisés en configuration diviseur (Figure 2b), en configuration coude à 90° (Figure 2c) et confrontés aux résultats obtenus avec la géométrie de référence

canal droit (Figure 1a). Trois vitesses de rotation de vis sont considérées : $N = 5, 30$ et 70 tr/min. Pour le canal droit, celles-ci correspondent respectivement à des débits massiques de $Q = 3,4 ; 18,2$ et $41,2$ kg/h. La variation de perte de charge (ΔP) induite par les pertes singulières du changement de direction (coude à 90°) ou l'augmentation de section (diviseur) est inférieure à 2MPa. La variation induite sur les débits massiques est inférieure à 2kg/h.

3.1. Configuration coude à 90°

La Figure 4 présente les températures relevées en sortie de l'écoulement, pour les configurations coude à 90° et canal droit. Pour tenir compte de la dissymétrie de la géométrie, une distinction est faite entre les profils mesurés horizontalement et verticalement (Figure 2b).

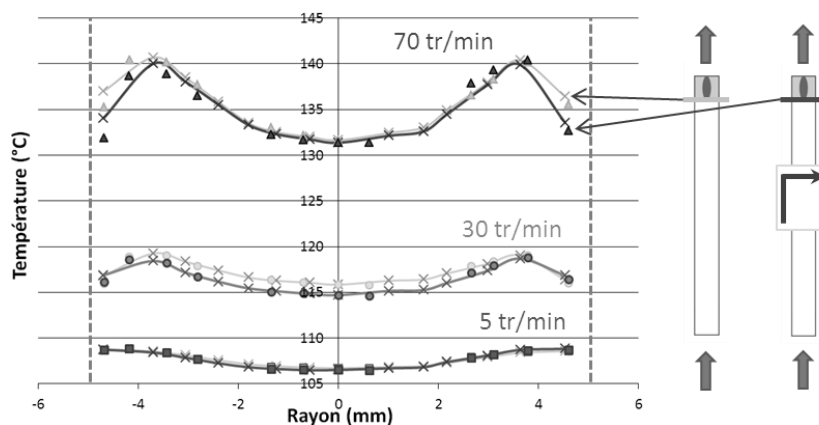


Figure 4 : Profils de température en sortie du canal droit (gris) et du canal coude à 90° (noir)

Les profils de température relevés dans les deux configurations sont très proches. L'écart moyen de température est de $0,08K$ à 5 tr/min, $0,8K$ à 30 tr/min et $0,6K$ à 70 tr/min. Ces profils de températures mesurés par la CMT de sortie sont le résultat de la dissipation visqueuse intervenant dans le système vis/fourreau et dans l'écoulement [5,6]. A 5 tr/min, la conduction est prédominante et la température est relativement homogène. A partir de 30 tr/min, un pic de dissipation visqueuse apparaît à environ $1,5$ mm de la paroi du canal. L'écart de température avec le centre de l'écoulement atteint alors près de $9^\circ C$ à 70 tr/min. Les principales différences observées entre les deux configurations, notamment près de la paroi à 70 tr/min, sont dues à une température de régulation plus faible dans la configuration coude 90° . Quelle que soit la vitesse de rotation, un changement de direction dans un écoulement d'élastomère n'a donc pas d'impact significatif sur le comportement thermique du matériau. Ce résultat est conforme à la répartition de la dissipation visqueuse obtenue précédemment par modélisation [3].

3.2. Configuration diviseur

La Figure 5 présente les températures relevées en sortie de l'écoulement, pour les configurations diviseur et canal droit. A 5 tr/min, la division de l'écoulement n'a que peu d'influence sur les profils de température. Par contre, à plus fort débit, la division de l'écoulement apporte d'importantes modifications sur le profil de température par rapport au canal droit.

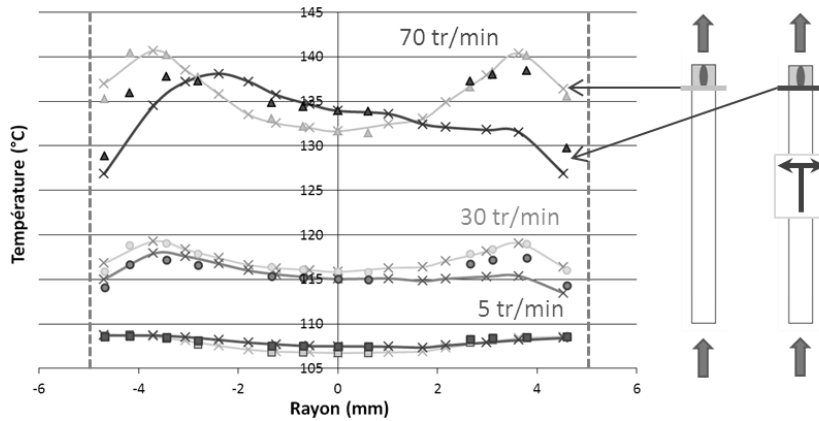


Figure 5 : Profils de température en sortie du canal droit (gris) et du diviseur (noir)

A 30 tr/min, la température de l'élastomère est globalement plus faible. Les cisaillements étant moins importants dans la zone où le débit est diminué, la dissipation visqueuse est, elle aussi, moins importante. Les pics de dissipation visqueuse se situent à la même position radiale que pour le canal droit. Toutefois, dans la configuration diviseur, ceux-ci sont inférieurs respectivement de 1,8K à $r = 3,5$ mm et de 3,6K à $r = -3,5$ mm par rapport à la configuration canal droit. Une dissymétrie apparaît sur le profil horizontal avec une température plus élevée pour le pic de dissipation à $r = -3,5$ mm.

A 70 tr/min les différences observables entre canal droit et diviseur sont accrues. La température de l'élastomère en sortie d'écoulement est beaucoup plus faible. Un écart de 6,6K est observé au niveau des pics de dissipation visqueuse. La dissymétrie sur le profil horizontal est accentuée.

Dans cette géométrie, la matière située au centre de l'écoulement en amont de la division est redistribuée en aval à proximité des parois. C'est cette dispersion de la matière qui induit une homogénéisation thermique partielle. La figure 6 présente de façon schématique l'impact de la division sur le champ de température (dissymétrie, homogénéité,...).

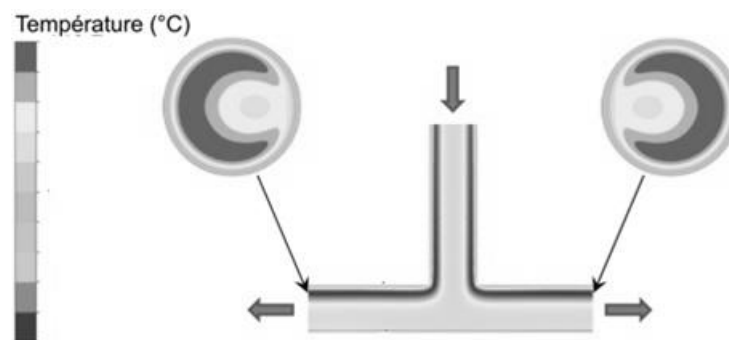


Figure 6 : Représentation du champ de température à proximité du diviseur

4. Homogénéisation thermique de l'écoulement

Dans cette partie, il s'agit de mettre à profit les résultats observés sur le diviseur de flux pour concevoir une géométrie d'homogénéisation thermique, efficace quelle que soit la vitesse de rotation considérée. Pour cela, on propose d'introduire dans l'écoulement un

élément dissipateur réalisé en acier (Figure 7a), à une position $z = 200$ mm. La géométrie et les dimensions de sa partie intrusive sont similaires à celles des cellules de mesure.

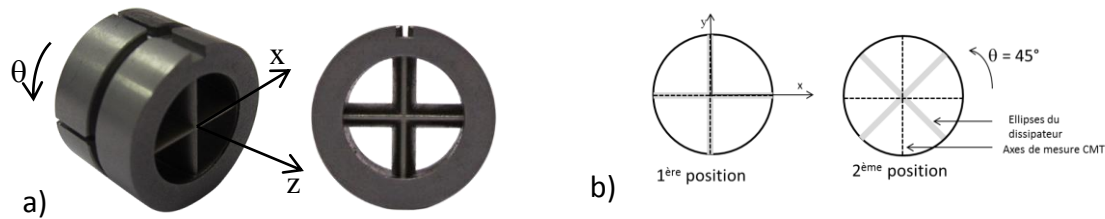


Figure 7 : Elément dissipateur (a) vue de face et de profil (b) mise en position dans l'écoulement

4.1. Présence d'un élément dissipateur dans l'écoulement

Deux positions relatives du dissipateur par rapport aux axes de mesure de la CMT sont étudiées et représentées sur la Figure 7b. On s'intéresse tout d'abord au premier cas, correspondant à une orientation commune des ellipses du dissipateur et des axes de mesures de la CMT.

Dans ce cas, l'introduction de l'élément dissipateur est à l'origine d'une augmentation des pertes de charges limitant la vitesse de rotation maximale acceptable par l'extrudeuse. De ce fait, les profils de température relevés en sortie du dispositif avec l'élément dissipateur sont comparés à l'essai de référence uniquement pour les vitesses de rotation $N = 5$ et 30 tr/min (Figure 8).

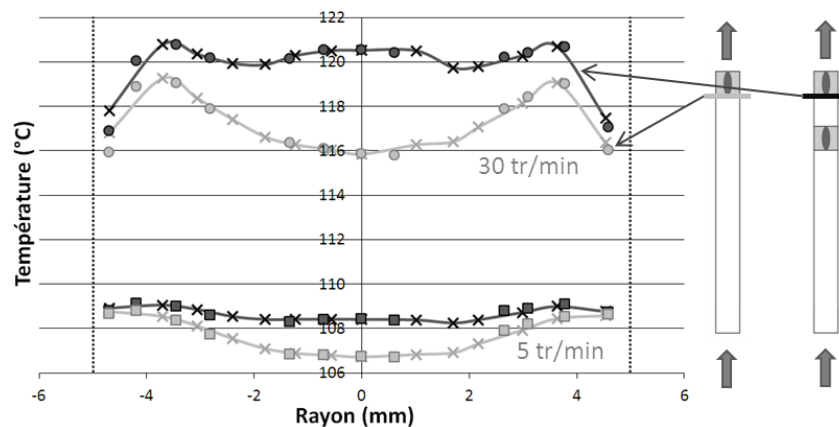


Figure 8 : Profils de température relevés en sortie du canal avec et sans élément dissipateur (a) sans rotation par rapport à la CMT (b) avec rotation de $\theta = 45^\circ$

L'ajout de l'élément dissipateur dans l'écoulement induit une augmentation significative de la température au centre de l'écoulement ($r = 0$ mm) respectivement de $1,7K$ et $4,7K$ à $N = 5$, 30 tr/min. La température augmentant aussi au niveau des pics de dissipation visqueuse (respectivement de $0,6K$ et $1,7K$), le profil de température est nettement plus homogène avec la présence du dissipateur.

4.2. Rotation de l'élément dissipateur

La conception du dispositif permet d'effectuer une rotation du dissipateur de $\theta = 45^\circ$ par rapport à la CMT (deuxième position de la Figure 7b). Dans ce cas, les profils de température

obtenus différent de la position précédente. La comparaison avec la géométrie de référence (Figure 9) montre une faible dissymétrie sur le profil de température à 5 tr/min.

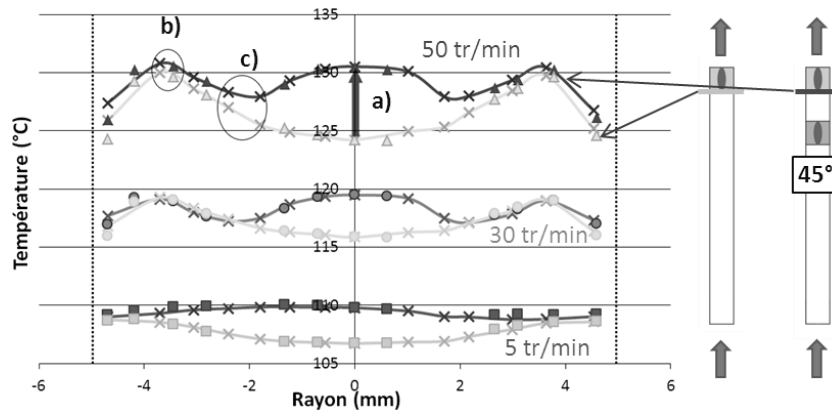


Figure 9 : Profils de température relevés en sortie du canal avec et sans élément dissipateur (inclinaison de 45°)

A 30 tr/min, la rotation du dissipateur à 45° fait apparaître un profil de température scindé en trois zones : un plateau de température au centre de l'écoulement, des pics de dissipation visqueuse près de la paroi et une température plus faible pour un rayon compris entre 1,5 et 2,5 mm. La température au centre augmente respectivement de 3K et 3,7K à N = 5 et 30 tr/min. Les températures sont très proches au niveau des pics de dissipation visqueuse à 30 tr/min.

4.3. Reconstruction du champ en température en sortie

La rotation de l'élément dissipateur revient à faire pivoter la CMT de 45° autour de son axe. La confrontation des profils mesurés permet donc finalement de déterminer le champ de température sur l'ensemble de la section d'écoulement. Pour cela, une interpolation des profils de température horizontaux et verticaux obtenus avec le dissipateur en position droite et tournée de 45° a été réalisée. Le champ de température reconstruit est présenté sur la Figure 10. Dans un canal droit, l'échauffement est situé à proximité des parois (pics de dissipation visqueuse). Cette reconstruction montre l'intérêt d'un tel élément qui permet de générer de l'échauffement au centre de l'écoulement.

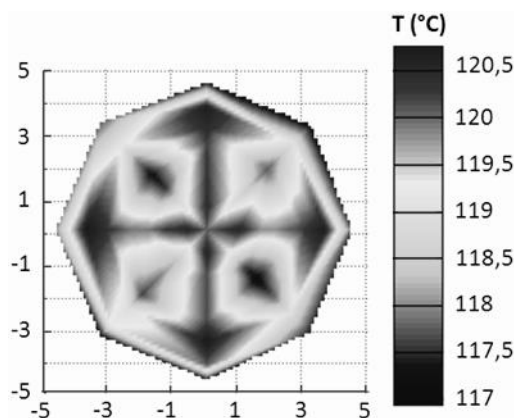


Figure 10 : Champ de température reconstruit à partir des mesures avec dissipateur à 30 tr/min

5. Conclusion

Un dispositif expérimental complexe a été mis en place afin de déterminer l'impact de géométries d'écoulement diverses sur le comportement thermique de matériaux polymères. Une instrumentation spécifique basée sur une mesure de température intrusive a été développée. Les résultats expérimentaux obtenus sur un élastomère montrent qu'un changement de direction a un faible impact sur l'homogénéité thermique de la matière. À l'inverse, une séparation du flux de matière en deux permet une redistribution thermique dans la section de l'écoulement. Un élément perturbateur permettant de dissiper la chaleur générée par dissipation visqueuse dans l'écoulement est proposé. Une forme géométrique double elliptique est proposée et introduite dans l'écoulement. Cet élément ajoute du cisaillement dans la matière lors de son passage près des ellipses. L'échauffement résultant est localisé et rend le profil de température axisymétrique. Toutefois, celui-ci s'homogénéise. Cet échauffement supplémentaire entraîne une augmentation de plusieurs Kelvin dans l'écoulement. Ainsi, une voie d'amélioration énergétique des procédés de mise en œuvre mise en avant dans ce travail serait la possibilité d'utiliser l'énergie supplémentaire fournie par dissipation visqueuse dans l'écoulement via l'introduction d'un élément perturbateur pour diminuer les temps de cuisson dans les moules.

Références

- [1] J.F. Agassant, P. Avenas, J.P. Sergent et B. Vergnes, *La mise en forme des matières plastiques*, 3^{ème} ed., Tec & Doc - Lavoisier (1996).
- [2] J.P. Beaumont, J.H. Young, M.J. Jaworski, Solving mold filling imbalances in multi-cavity injection molds, *J Inj Molding Tech*, 2, 2 (1998), 47-58
- [3] J. Launay, N. Allanic, P. Mousseau, R. Muller et R. Deterre, Scorch arisen prediction through elastomer flow in extrusion die, *Int. J. Mater. Form.*, DOI 10.1007/s12289-012-1120-9.
- [4] J. Launay, N. Allanic, P. Mousseau, R. Deterre et Y. Madec, Intrusive measurement of polymer flow temperature, *Polymer Science Engineering*, DOI 10.1002/pen.23839J.
- [5] Y. Wielhorski, P. Mousseau, Y. Jarny, D. Delaunay et N. Lefevre, Thermal balance between viscous heating and inlet thermal condition in non stationary polymer flow through a cylindrical die, *Int. J. Therm. Sci.*, 50-5 (2011), 769-778
- [6] M. Karkri, Y. Jarny, P. Mousseau, Thermal state of an incompressible pseudo-plastic fluid and Nusselt number at the interface fluid-die wall, *Int J Therm Sci*, 47,10, (2008), 1284-1293.