

## Chapitre 4

# RÉSULTATS OBTENUS ET ANALYSE

### 4.1 Simulations préliminaires avec Moldflow<sup>®</sup>

La première partie de ce projet a consisté à étudier le comportement du fluide à l'aide du logiciel Moldflow<sup>®</sup>. Ce logiciel a été sélectionné car il est spécialisé dans la simulation du moulage à injection, et sa présence importante dans une grande partie des articles consultés pour ce projet ont fait de lui un logiciel qui semble fiable et utile pour la résolution de ce problème.

#### 4.1.1 Résultats obtenus avec Moldflow Adviser<sup>®</sup>

Avec ce logiciel, plusieurs types de textures ont été testées, présentées plus bas en figure 4.1. Sur ces figures nous pouvons observer des géométries développées sur le logiciel de conception Solidworks<sup>®</sup>, avec des textures triangulaires de 0,2 mm sur la figure 4.1a et des textures rectangulaires de 0,2 mm sur la figure 4.1b. Ces fichiers de géométrie ont ensuite été implémentés dans le logiciel Moldflow Adviser<sup>®</sup>.

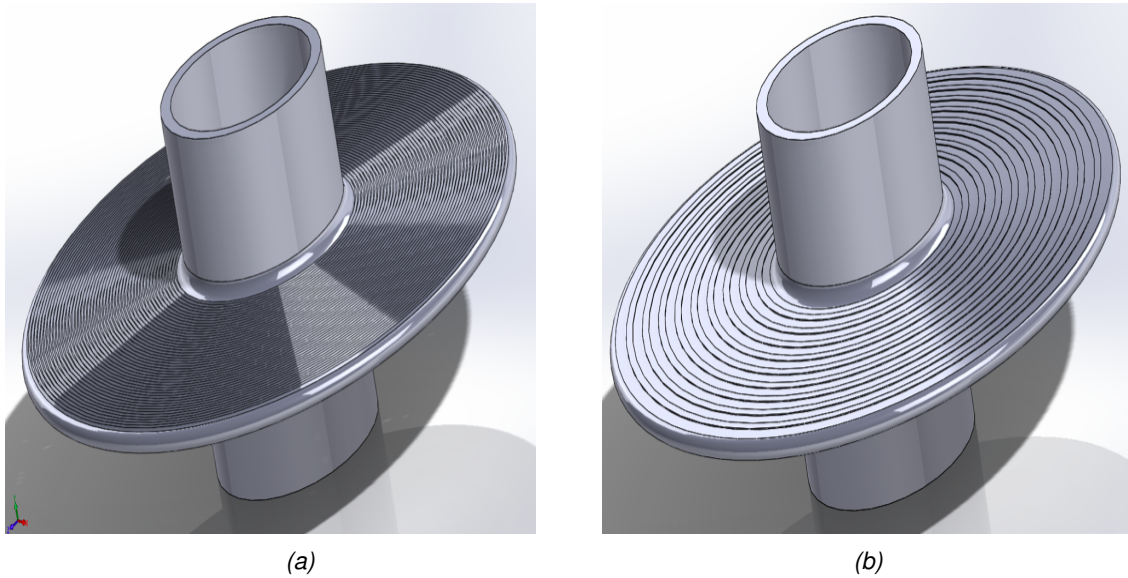


FIGURE 4.1 – Extrait des micro-textures testées avec Moldflow Adviser®. (a) Isolateur composé de microtextures triangulaires de 0,2 mm. (b) Isolateur composé de microtextures rectangulaires de 0,2 mm.

La figure 4.2 présente un zoom sur les microtextures testées avec le logiciel Moldflow®. Nous pouvons observer que les microtextures rectangulaires testées sont distancées de 0,2 mm.

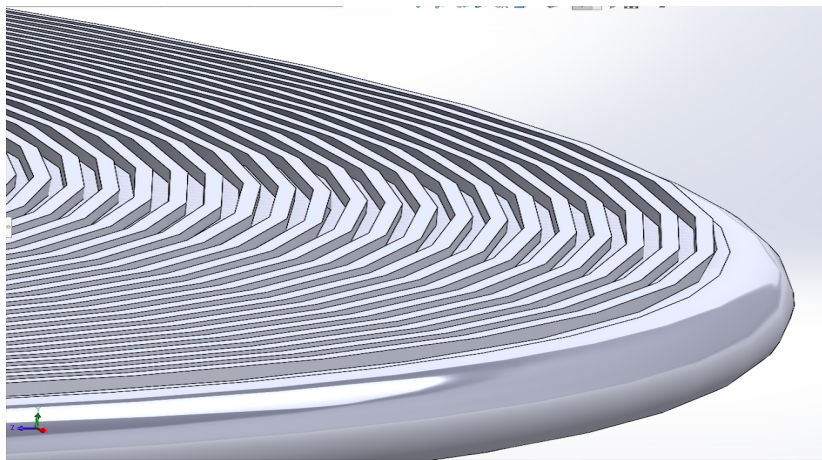


FIGURE 4.2 – Zoom sur la disposition des microtextures dans le logiciel Moldflow®

À l'importation d'un modèle, le logiciel lance systématiquement une analyse de ce dernier pour vérifier les défauts éventuels de la géométrie et, si oui, propose de les réparer. Moldflow

Adviser® ne travaille qu'avec des modèles en trois dimensions, mais à l'issue de l'importation d'un modèle, il propose deux types d'analyses différentes pour la résolution, en se basant sur l'épaisseur de la géométrie et ses caractéristiques. Les types d'analyses proposés sont l'analyse Dual Domain et l'analyse 3D.

- Analyse 3D : Cette analyse est majoritairement utilisée pour les géométries épaisses. Elle utilise plus de ressources mais donne des résultats plus cohérents que l'analyse en Dual Domain pour ce genre de géométrie, car elle concentre son analyse et la discrétisation du domaine sur l'ensemble de la géométrie, et non pas uniquement sur la surface de cette dernière, comme le fait l'analyse Dual Domain. Ce type d'analyse prend en moyenne entre 30 et 50 min en terme de temps de calcul.
- Analyse Dual Domain : Cette analyse est très bien pour les géométries de type coque, ayant des parois fines. Elle ne calcule les résultats que sur la surface de la géométrie et fait l'hypothèse que le flux à l'intérieur du moule est laminaire. Cette analyse-ci est beaucoup plus rapide en temps de calcul car elle demande se concentre majoritairement sur la surface de la géométrie. Il suffit en moyenne d'environ 10 min de temps de calcul pour obtenir les résultats de cette analyse.

Dans la figure 4.3, nous pouvons observer les différents types d'analyses proposés par Moldflow Adviser. Dans notre cas, les deux types d'analyses ont été testés. Il en ressort sensiblement les mêmes résultats, mais pour obtenir ceux de l'analyse 3D, cela demande plus de temps et de ressources à l'ordinateur. Ils sont cependant légèrement plus précis.

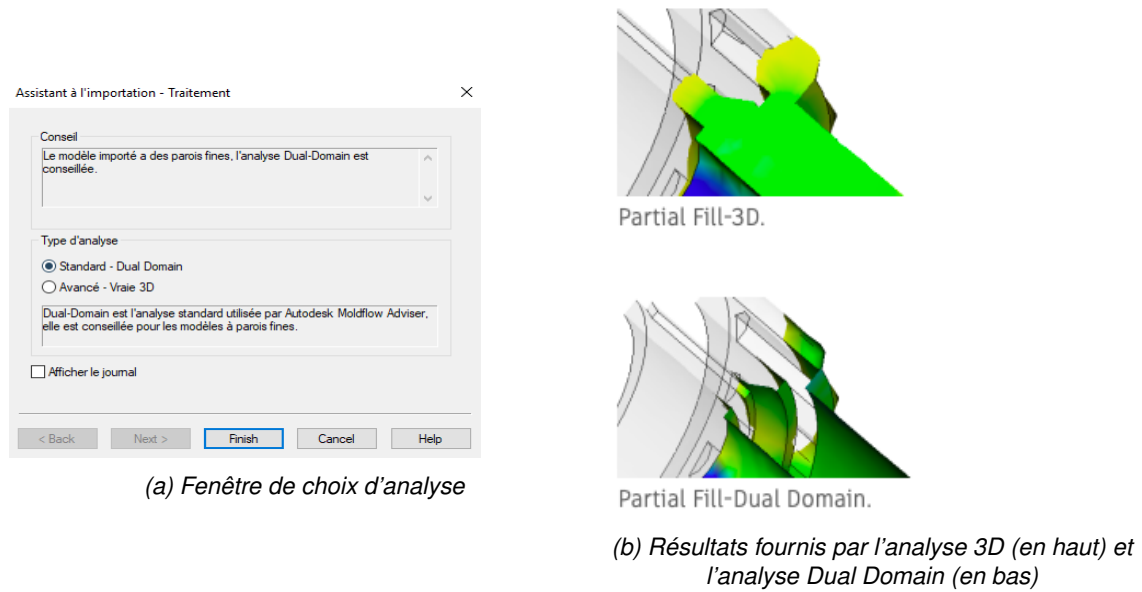


FIGURE 4.3 – Différence entre l'analyse 3D et l'analyse Dual Domain dans le logiciel Moldflow.

Pour notre problème, Moldflow nous conseille majoritairement l'analyse 3D, car celle-ci décrit mieux le comportement du fluide au sein de la cavité. Une fois l'analyse sélectionnée, il est nécessaire de choisir l'emplacement de la porte d'injection, qui se situe à l'extrémité de la jupe.

Concernant le choix du matériau pour la simulation et des paramètres de traitement de la simulation : À ce niveau, Moldflow Adviser® ne permet que peu de modifications. Seuls des matériaux thermoplastiques ou des élastomères thermoplastiques sont disponibles, et seules les valeurs de température de moule et de polymère sont modifiables, dans les limites imposées par les informations données par le matériau.

Au vu de ces limitations drastiques par le logiciel Moldflow Adviser®, nous avons décidé de nous tourner vers la compagnie Autodesk afin d'acquérir la version complète du logiciel Moldflow, à savoir Moldflow Insight Ultimate®. Grâce à la compagnie, nous avons ainsi pu obtenir une licence du logiciel Moldflow Insight Ultimate® avec laquelle travailler.



### 4.1.2 Résultats obtenus avec Moldflow Insight Ultimate 2018<sup>®</sup>

Moldflow Insight<sup>®</sup> nous permet d'obtenir des informations importantes sur l'état des paramètres de traitement lors du moulage à injection : le temps de remplissage, la pression interne dans le moule et l'évolution de la température du polymère.

#### 4.1.2.1 Géométrie et maillage

Plusieurs tailles de microtextures ont été testées avec ce logiciel, afin de déterminer la taille minimale avec laquelle Moldflow<sup>®</sup> peut opérer. À partir de textures de 1 mm, nous sommes descendus jusqu'à des textures de 0,5, 0,3, 0,2 et 0,1 mm. Cependant, Moldflow Insight<sup>®</sup> n'est plus capable de nous donner de résultats pour des textures en dessous de 0,5 mm, tout comme Moldflow Adviser<sup>®</sup>. Ceci pourrait être dû à plusieurs raisons :

- Les données rhéologiques de Moldflow<sup>®</sup> ne sont pas appropriées pour les comportements du fluide au niveau des textures ;
- La sensibilité géométrique du logiciel n'atteint pas l'échelle microscopique ;
- La puissance de l'ordinateur (notamment la mémoire RAM) n'est pas suffisante pour supporter le calcul nécessaire à la résolution. Cette explication serait la plus plausible pour ce projet : les ressources réunies, bien qu'importantes, ne sont pas suffisantes pour faire tourner un logiciel aussi exigeant que Moldflow dans le domaine microscopique.

Nous avons tout de même lancé des simulations à l'échelle macroscopique avec Moldflow Insight<sup>®</sup> afin d'observer l'évolution des différents paramètres les uns en fonction des autres.

La figure 4.4 présente la géométrie et le maillage sélectionné selon les spécifications fournies par l'entreprise K-Line Insulators Co. Le maillage sélectionné pour cette géométrie

dans Moldflow est constitué d'éléments tétraédriques en 3D. La table 4.1 présente ensuite le nombre d'éléments, de noeuds et le volume total de la cavité à remplir.

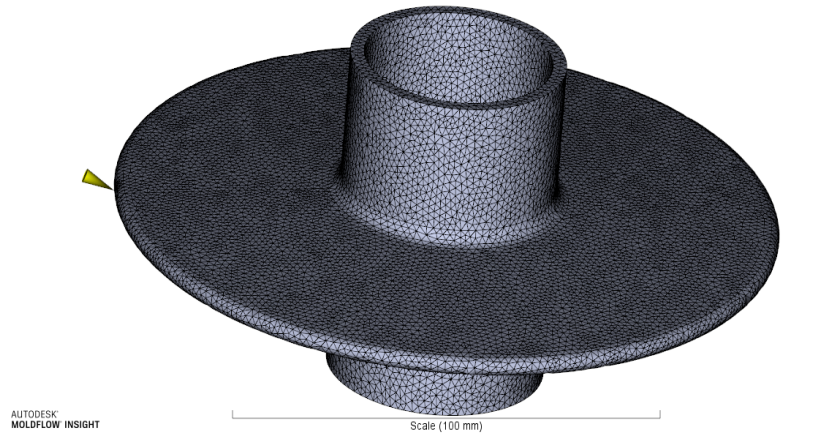


FIGURE 4.4 – Géométrie et maillage sur Moldflow®. La flèche jaune à gauche de l'isolateur représente l'emplacement de la porte d'injection choisie pour cette simulation.

TABLE 4.1 – Caractéristiques du maillage sélectionné pour l'isolateur avec Moldflow Insight Ultimate 2019.

| Caractéristiques du maillage avec Moldflow            |
|---|
| Nombre total d'éléments tétraédriques : 1027105       |
| Nombre total de noeuds : 185929                       |
| Volume total de la cavité à remplir : 138.5762 $cm^3$ |

Les conditions aux limites de ce problème sur Moldflow® sont les suivantes :

- Au niveau de l'extrémité gauche de l'isolateur, on place la porte d'injection. Cette dernière fait environ 3,96 mm de diamètre. Elle est représentée sur la figure 4.4 par une flèche jaune ;
- Le matériau utilisé pour les simulations est le caoutchouc de silicone liquide LSR de l'entreprise Dow-Corning, présenté dans la table 4.2 ;
- La température du moule à l'instant initial est telle que  $T_{moule} = 152^{\circ}C$ .
- La température du polymère (ici, l'élastomère de silicone liquide) à l'instant initial est telle que  $T_{poly} = 20^{\circ}C$ .

Ces températures sont les températures communément utilisées dans l'industrie. Nous les avons donc sélectionnées comme paramètres de départ de notre étude.

TABLE 4.2 – Propriétés du matériau sélectionné pour l'analyse avec Moldflow Insight

| Propriétés du LSR sélectionnées pour les simulations avec Moldflow Insight             |
|--|
| Densité : $\rho = 1100 \text{ kg.m}^{-3}$  |
| Viscosité dynamique : $\mu = 120 \text{ Pa.s}$   |
| Module de Young : $E = 25e^{+6} \text{ Pa}$  |
| Conductivité thermique : $k_{iso} = 0,180 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$              |
| Coefficient d'expansion thermique : $\alpha_{iso} = 280e^{-6} \text{ K}^{-1}$          |
| Capacité thermique à pression constante : $C_p = 1,26 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ |
| Ratio des chaleurs spécifiques : $\gamma = 0,2$  |
| Module de cisaillement : $G = 3e^{+5} \text{ N.m}^{-2}$                                |

Au vu de ces conditions, nous avons ensuite voulu vérifier les différents résultats que nous pouvions obtenir avec Moldflow et avons donc testé les variations de température et de pressions d'injection.

#### 4.1.2.2 Variation des températures du moule et du polymère

Les paramètres de traitement sur le logiciel Moldflow<sup>®</sup> sont très difficiles à modifier : en effet, les bases de données de ce logiciel sont faites pour coller le plus à la réalité, afin de donner les résultats les plus cohérents et réalistes possibles. Ceci permet également de renseigner plus précisément l'utilisateur quant aux différentes valeurs des paramètres de traitement pour obtenir un remplissage complet du moule.

Les paramètres de traitement industriels utilisés dans ce projet sont présentés dans la table 4.3 :

TABLE 4.3 – Conditions initiales fournies par K-Line Insulators Co.

| Conditions initiales du projet fournies par l'entreprise                  |
|---|
| Vitesse d'injection : $u = 8 \text{ mm.s}^{-1}$                           |
| Pression d'injection : $P = 100 \text{ bar}$                              |
| Température du moule : $T_m = 152^\circ\text{C}$                          |
| Température du polymère : $T_p = 20^\circ\text{C}$ (température ambiante) |

Pour les simulations sur Moldflow®, trois températures de moule ont donc été considérées : 132°C, 152°C et 172°C ; ainsi que trois températures de polymère : 15°C, 20°C et 25°C. Ces températures ont été sélectionnées afin d'observer l'effet qu'ont les modifications de température sur le remplissage du moule. Une température plus basse, 132°C, une température moyenne de 152°C, et une température plus haute, 172°C, ont donc été choisies pour effectuer ces simulations.

Sur la figure 4.5 et dans la table 4.4, nous pouvons observer l'évolution du temps de remplissage, en secondes, en fonction des températures du moule et du polymère.

TABLE 4.4 – Évolution du temps de remplissage en fonction des températures du moule et du polymère

|                         |       | Température du moule |        |        |
|-------------------------|-------|----------------------|--------|--------|
|                         |       | 172 °C               | 152 °C | 132 °C |
| Température du polymère | 15 °C | 1,7s                 | 3,6s   | 7,3s   |
|                         | 20 °C | 1,7s                 | 3,6s   | 7,3s   |
|                         | 25 °C | 1,7s                 | 3,6s   | 7,3s   |

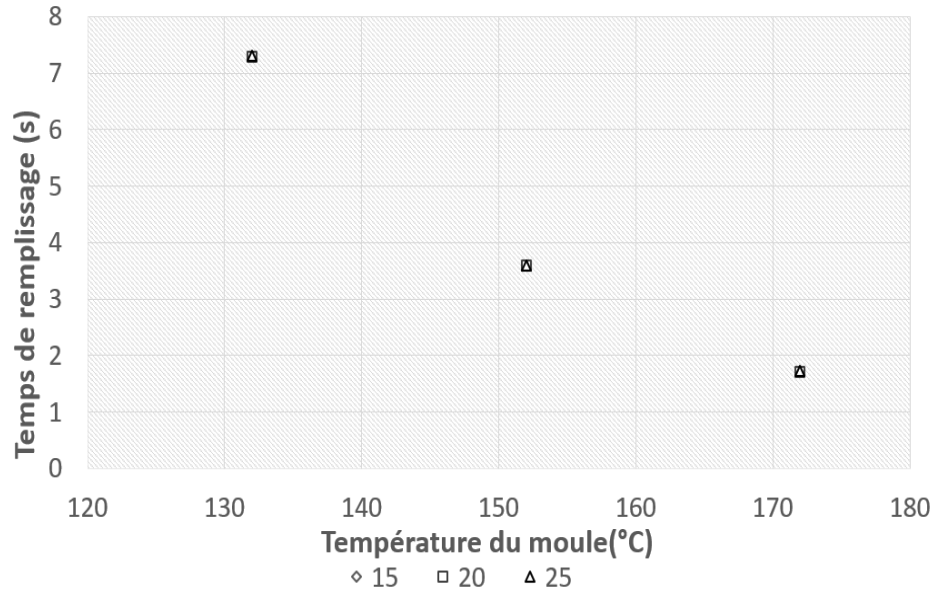


FIGURE 4.5 – Évolution du temps de remplissage en fonction des températures du moule et du polymère. Les températures de moule testées sont 172 °C, 152 °C et 132 °C. Les températures de polymères testées sont 25 °C, 20 °C et 15 °C.

Nous pouvons observer que plus la température du moule augmente, plus le temps de remplissage diminue. En effet, pour un moule chauffé à 172 °C, on a un temps de remplissage qui équivaut à environ 1,7 s, tandis que pour un moule chauffé à 132 °C, on a un temps de remplissage qui augmente à environ 7,3 s. Nous pouvons donc en déduire que le temps de remplissage est grandement influencé par la température du moule : en effet, plus la température du moule augmente, plus le temps de remplissage est réduit, ce qui corrobore les résultats des articles consultés pour ce projet. En effet, selon ces articles [20, 26, 31], l'augmentation de la température du moule implique une diminution de la viscosité du matériau, ce qui rend le flux du polymère plus aisé et donc le remplissage plus rapide. De plus, nous pouvons observer que lorsque nous augmentons la température du polymère, celui-ci n'aurait aucune influence sur le temps de remplissage de la cavité. En effet, les résultats de temps de remplissage obtenus pour chaque température de polymère testés sont similaires. Nous pouvons en déduire que selon ces simulations, la température du polymère n'a pas

d'influence significative sur le temps de remplissage de la géométrie. Cela rentre cependant en contradiction avec les articles consultés pour ce projet [34, 35]. Ceci pourrait être dû au fait que ces articles traitent de polymère thermoplastique, alors que nous faisons nos simulations avec un élastomère thermodurcissable ici. Nous pouvons également observer que la répartition des températures est linéaire dans la table 4.5. En effet, pour une température de 132 °C, on a un temps de remplissage de l'ordre de 7 s, et pour une température plus élevée de 172 °C on a un temps de remplissage de l'ordre de 2 s.

Dans la table 4.5 et la figure 4.6, nous pouvons voir l'évolution de la pression d'injection moyenne dans le moule lors du remplissage en fonction des températures du moule et du polymère.

TABLE 4.5 – Évolution des pressions d'injection en fonction des températures du moule et du polymère

|                         |       | Température du moule |         |         |
|-------------------------|-------|----------------------|---------|---------|
|                         |       | 172 °C               | 152 °C  | 132 °C  |
| Température du polymère | 15 °C | 3,4 MPa              | 3,3 MPa | 3,3 MPa |
|                         | 20 °C | 3,1 MPa              | 3,1 MPa | 3,0 MPa |
|                         | 25 °C | 2,8 MPa              | 2,8 MPa | 2,8 MPa |

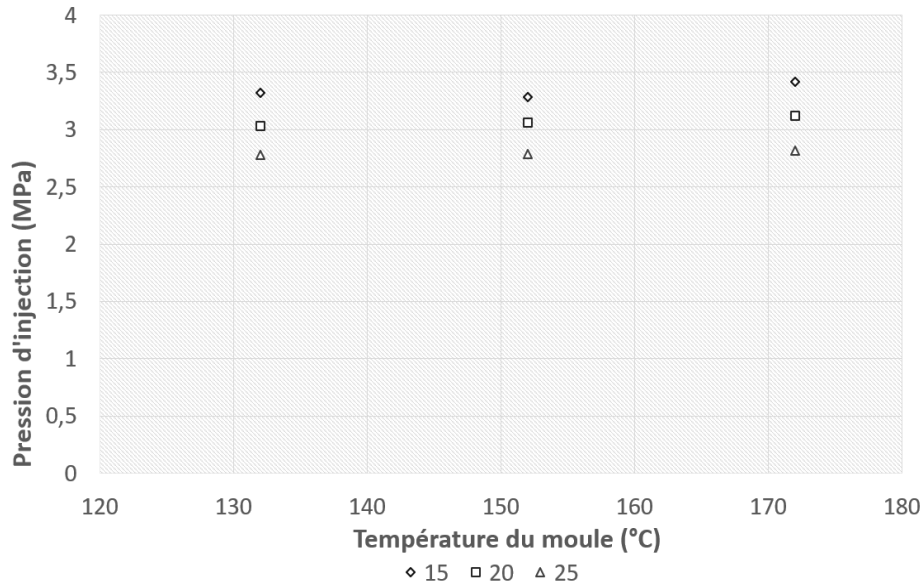


FIGURE 4.6 – Évolution de la pression d'injection moyenne en fonction des températures du moule et du polymère. De même, les températures de moule testées sont 172 °C, 152 °C et 132 °C. Les températures de polymères testées sont 25 °C, 20 °C et 15 °C.

Nous observons que la pression moyenne dans le moule augmente lorsque la température du polymère diminue. En effet, pour une température de polymère à 15 °C, nous avons une pression moyenne d'environ 3,3 MPa, tandis que pour une température de polymère à 25 °C, nous avons une pression moyenne d'environ 2,8 MPa. Il semblerait donc que la température du polymère aurait une influence significative sur la pression moyenne à l'intérieur de la cavité, comme cela est mis en avant dans les articles de Lin [34] et Sha [35]. De plus, nous pouvons observer que la modification de la température du moule n'a pas d'influence significative sur la pression moyenne dans le moule.

Ainsi il semblerait que selon Moldflow, la température du moule a une influence significative sur le temps de remplissage, tandis que la température du polymère a une influence sur la pression moyenne au sein de la cavité. Cela rejoint les articles consultés pour ce projet car ces deux paramètres ont bien une influence sur le moulage à injection de notre géométrie.

Moldflow® nous donne ainsi des informations intéressantes au niveau macroscopique

concernant les valeurs des paramètres de traitement, comme la température du moule ou la température du polymère, et leurs influences les uns sur les autres. Cependant, notre projet voit son intérêt dans la simulation de microtextures. En effet, l'objectif de ce projet est de vérifier qu'il est possible de simuler numériquement le remplissage de micro-textures et d'observer ce remplissage à l'aide des différents logiciels utilisés. Cependant, Moldflow ne nous permet pas d'observer le remplissage des textures. Du matériel informatique plus performant serait plus à même de nous fournir des informations sur le remplissage de microtextures. Les résultats obtenus à l'issue des variations de température données à l'aide de Moldflow® ont donc été stockées et nous nous sommes penchées sur le développement d'un modèle COMSOL® avec des microtextures.

## 4.2 Validation du modèle numérique établi avec COMSOL®

Avant l'établissement d'un modèle numérique avec COMSOL Multiphysics 5.4®, il est important de vérifier que celui-ci soit en adéquation avec ce que l'on peut rencontrer dans la réalité. Comme il n'est pas toujours possible d'effectuer des vérifications avec le prototype réel, différentes méthodes ont été mises en place pour vérifier la validité d'un modèle numérique, comme expliqué dans la partie 2.8.4.

Pour notre projet, deux méthodes ont été choisies afin de vérifier la validité des résultats fournis par le modèle COMSOL :

- La méthode numérique, en se basant sur l'article de J.F. Héту et al. [61] ;
- La méthode expérimentale, en utilisant un prototype très simplifié pour représenter le remplissage du moule et des textures.



### 4.2.1 Validation expérimentale

Afin de valider les simulations numériques faites avec COMSOL, des expérimentations ont été réalisées pour simuler le remplissage d'un moule ayant des textures en surface.

L'objectif principal de cette expérimentation était de vérifier que le flux de liquide dans le moule et les textures représentaient correctement la réalité.

Pour cela, le matériel employé est simple : deux seringues en plastique ont été utilisées pour le moule et le contenant de liquide initial. Un tuyau d'approvisionnement de liquide en plastique a été utilisé pour connecter les deux seringues entre elles et approvisionner le liquide d'une seringue à l'autre. La mise en place de l'expérimentation est présentée dans la figure 4.7.

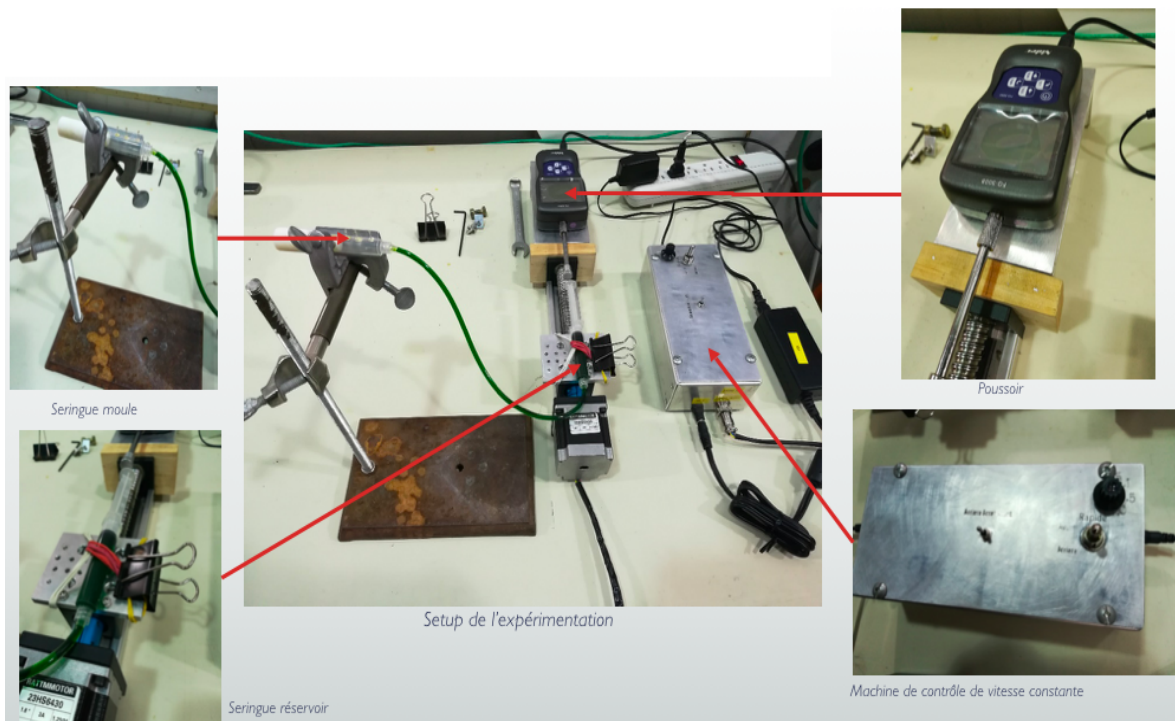


FIGURE 4.7 – Mise en place de l'expérimentation. En haut à gauche, nous avons la seringue utilisée comme moule, en bas à gauche la seringue contenant le fluide à l'instant  $t=0$  s, en haut à droite la machine poussoir permettant d'injecter le fluide à vitesse constante dans la seringue moule, et en bas à droite le contrôleur de vitesse.

La seringue moule a été fabriquée de façon à tenter de représenter au mieux le ratio

d'aspect rencontré dans la simulation du modèle principal : en effet, dans le modèle principal, le moule a des dimensions de l'ordre du millimètre et les micro-textures ont des dimensions de l'ordre du micromètre. les dimensions de la seringue moule sont présentées plus bas.

Le liquide choisi est de l'eau distillée mélangée à du colorant alimentaire afin de voir plus facilement l'écoulement de l'eau dans le moule.

Afin de mesurer les paramètres importants pour la simulation numérique, nous avons opté pour un instrument fabriqué par le laboratoire. Cet instrument utilise une vis sans fin et permet de pousser la seringue à une vitesse et une force constantes. Quatre vitesses sont possibles avec la machine à vitesse constante : 0,05 mm/s, 0,1 mm/s, 0,5 mm/s et 1 mm/s.

Après plusieurs essais expérimentaux avec chacune des vitesses, des vidéos ont été réalisées afin d'observer le comportement du fluide lors du remplissage du moule. En guise de présentation du résultat de l'expérimentation, nous pouvons voir sur la figure suivante une capture d'écran de l'évolution du fluide dans la cavité.

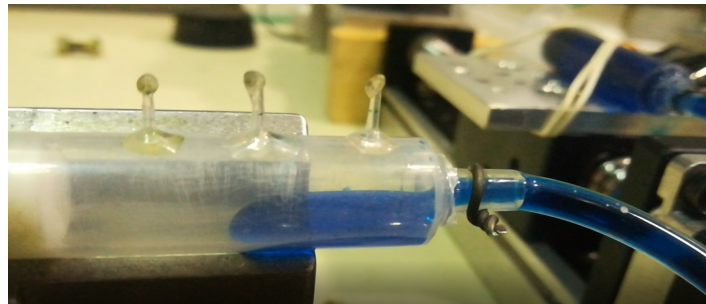


FIGURE 4.8 – Capture d'écran d'une vidéo de l'expérimentation

Après avoir obtenu les vidéos de simulation, un modèle COMSOL a été mis en place pour reproduire l'expérimentation en utilisant le même modèle numérique que pour la simulation principale. Pour cette simulation de l'expérimentation cependant, le matériau sélectionné dans un premier temps a été l'eau, afin que les résultats numériques puissent être comparés aux résultats expérimentaux. Dans les figures 4.9, nous pouvons observer la géométrie de la seringue-moule reproduite dans COMSOL, ainsi que le maillage choisi pour cette géométrie.

Il s'agit d'un maillage triangulaire raffiné aux parois, puis plus grossier au niveau du centre de la cavité du moule. Pour ce maillage, des éléments de taille comprise entre 0,0302 cm et 0,101 cm ont été utilisés, et l'option couche limite a été sélectionnée dans Moldflow afin d'observer plus précisément le comportement du fluide au niveau des parois.

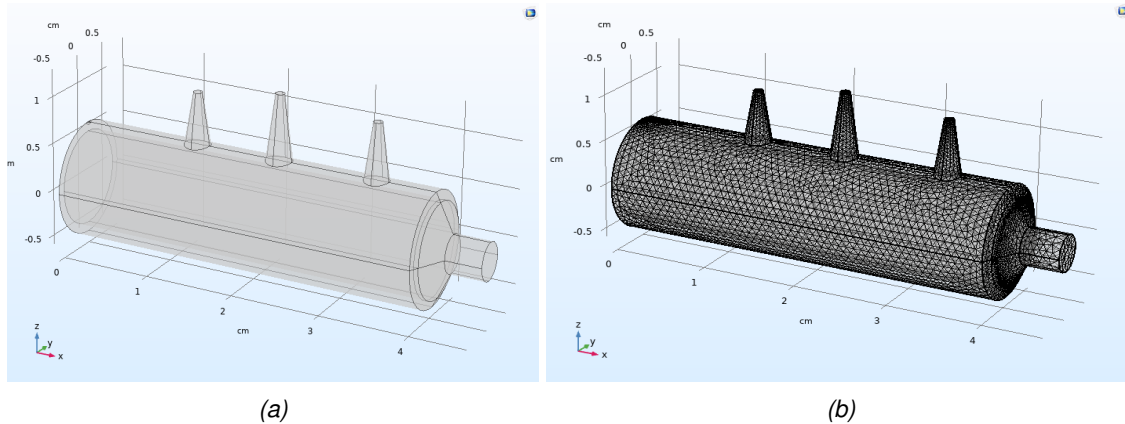


FIGURE 4.9 – Mise en place du modèle pour l'expérimentation. (a) : Géométrie de l'expérimentation sur COMSOL. (b) : Maillage de la géométrie COMSOL de l'expérimentation.

Le modèle COMSOL de l'expérimentation comprend une seringue-moule aux dimensions suivantes :

- Longueur : 40,3 mm
- Diamètre intérieur : 10,0 mm
- Diamètre extérieur : 11,6 mm
- Longueur des tuyères : 5,00 mm, 6,50 mm et 6,00 mm
- Diamètre des tuyères : 3,00 mm, 2,60 mm, 3,00 mm

Nous pouvons observer dans les figures 4.10 l'évolution de la pression dans la cavité entre  $t=0$  s et  $t=5$  s.

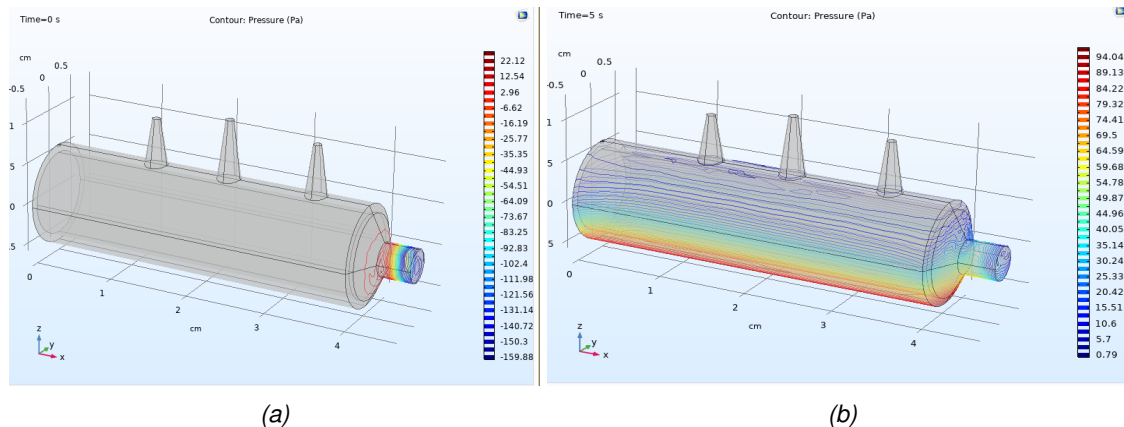


FIGURE 4.10 – Pression au sein de la cavité pour l'expérimentation. (a) : Pression dans la cavité à  $t = 0$  s. (b) : Pression dans la cavité à  $t = 5$  s.

Nous obtenons des pressions maximales avoisinant les 100 Pa, ce qui n'est pas très important au vu des pressions auxquelles l'expérimentation doit faire face dans la réalité. En effet, Moldflow nous donne des pressions de l'ordre du mégapascal lorsque nous observons les pressions moyennes dans la cavité du moule. Ceci pourrait être expliqué par le fait que l'expérimentation réelle compte trop de paramètres peu contrôlés, comme par exemple des évacuations d'air non prévues. Ces paramètres seraient nécessaires dans la mise en place de la simulation sur COMSOL Multiphysics. Les défauts de fabrication du moule peuvent fausser de façon importante les résultats expérimentaux obtenus et ainsi ne pas corroborer les résultats obtenus avec COMSOL Multiphysics.

Sur les figures 4.11, nous pouvons voir l'évolution de la fraction volumique de fluide dans l'expérimentation. L'eau, en bleu, est injecté par la porte d'injection dans la cavité remplie d'air, en rouge. L'eau va ensuite remplir progressivement la cavité. Nous observons que l'écoulement dans le modèle est assez similaire à l'écoulement en réalité d'un point de vue qualitatif, mais que le remplissage prend beaucoup moins de temps que pour l'expérimentation réelle.

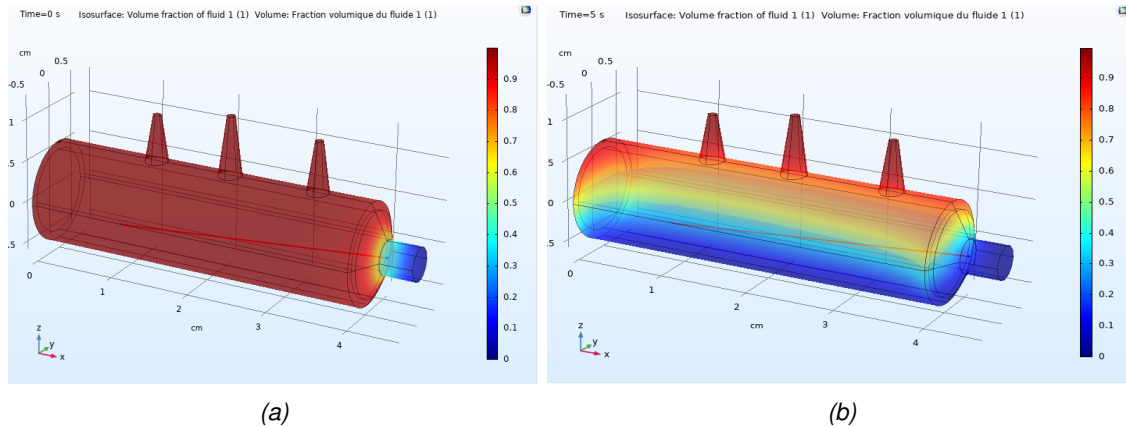


FIGURE 4.11 – Fraction volumique de fluide au sein de la cavité pour l'expérimentation. Fraction volumique de fluide dans la cavité à  $t = 0$  s. (b) : Fraction volumique de fluide dans la cavité à  $t = 5$  s.

Nous observons dans la figure 4.12 l'évolution de la vitesse dans la seringue entre  $t = 0$  s et  $t = 5$  s. Cependant, nous constatons que la vitesse est beaucoup plus importante au sein de la cavité que dans la réalité : en effet, pour des vitesses de l'ordre du mm/s en réalité, nous obtenons des vitesses du cm/s, ce qui à notre échelle représente une différence assez importante.

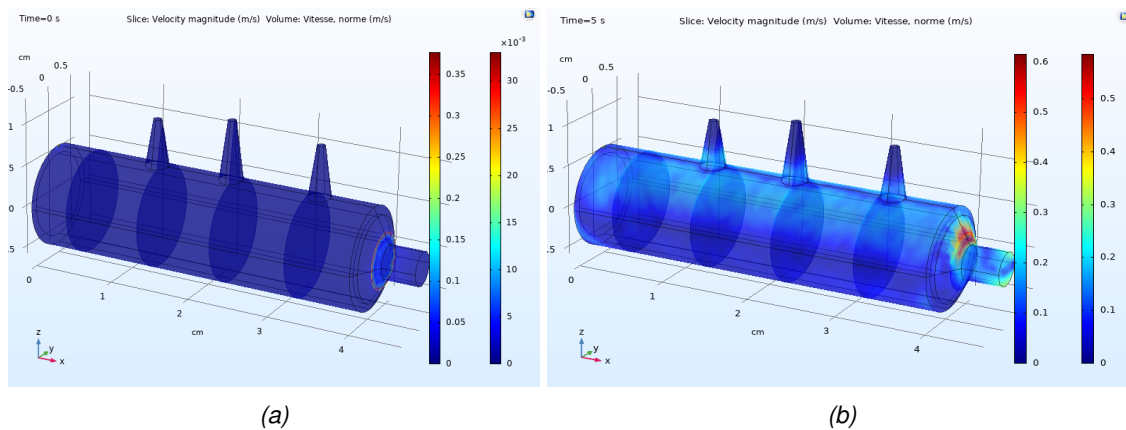


FIGURE 4.12 – Vitesse au sein de la cavité pour l'expérimentation. (a) : Vitesse dans la cavité à  $t = 0$  s. (b) : Vitesse dans la cavité à  $t = 5$  s

Dans la table 4.6 nous pouvons observer les comparaisons des vitesses et des pressions de l'expérimentation et de la simulation COMSOL de l'expérimentation.

TABLE 4.6 – Comparaison des vitesses et pressions dans l'expérimentation et dans la simulation numérique de l'expérimentation.

|          | Expérimentation | Simulation |
|----------|-----------------|------------|
| Vitesse  | 0,55 mm/s       | 0,5 cm/s   |
| Pression | 0,2 MPa         | 100 Pa     |

Il semble donc selon la figure précédente que comme nous l'avons vu avec les résultats précédents, COMSOL surestime la vitesse du fluide dans la cavité d'au moins  $10^1$  cm/s, et sous estime la pression dans la cavité d'au moins  $10^6$  Pa. Ceci est sûrement dû au fait que lors de la mise en place de la géométrie dans COMSOL, certains paramètres n'ont pas été ou ont moins bien été pris en compte. Afin de pallier à ce problème, il serait intéressant de mettre en place une meilleure expérimentation, notamment en améliorant la gestion des pressions au sein de la cavité. Créer une expérimentation sans fuite d'air et capable de supporter des pressions de l'ordre de la 10aine ou 100aine de MPa pourrait nous permettre de la reproduire de façon plus précise et correcte dans COMSOL Multiphysics, et ainsi nous permettrait d'avoir des résultats plus cohérents.

Il semble donc que notre modèle arrive correctement à prédire le comportement du fluide au sein de la cavité d'un point de vue qualitatif, mais il réside toujours un problème de vitesse et de pressions dans notre modèle d'expérimentation. En effet, la cavité se remplit beaucoup trop vite par rapport à la réalité et les vitesses obtenues avec COMSOL sont beaucoup trop importantes.

Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les conditions expérimentales présentent des caractéristiques géométriques qui peuvent différer de la géométrie que nous avons avec

COMSOL. En effet, il y a dans l'expérimentation réelle des défauts, des trous, par lesquels l'air et l'eau peuvent s'échapper et qui ne sont pas prises en compte dans la simulation sur COMSOL. La figure 4.13 présente les problèmes majeurs rencontrés lors de la mise en place de l'expérimentation.

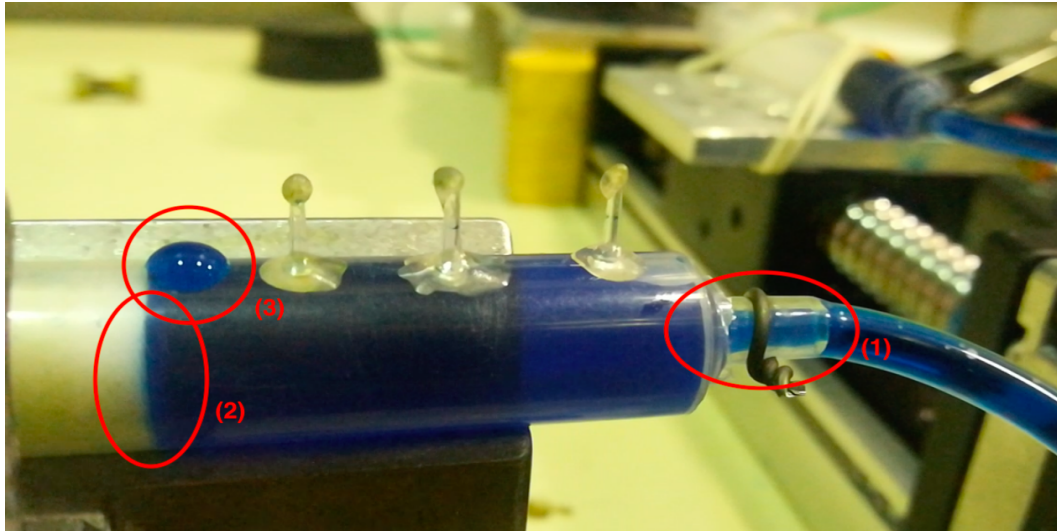


FIGURE 4.13 – Problèmes d'évacuation d'eau et d'air dans l'expérimentation effectuée.

Comme le montre la figure 4.13, la jonction en (1) entre le tuyau de connexion et les seringues a dû être consolidée, car dans les premières expérimentations, ce dernier ne supportait pas la pression emmagasinée dans le dispositif. Après avoir consolidé cette jonction, l'air contenu dans la seringue ne pouvait plus s'échapper correctement. Ceci a causé des bris dans les textures qui se sont décollées sous l'effet de la pression. De plus, nous avons pu constater que malgré les précautions prises, l'eau s'échappaient également au niveau de la fermeture de la seringue moule en (2). Afin de pallier à ce problème, les textures ont été réparées et une évacuation d'air contrôlée a été rajoutée en (3). Cette évacuation d'air a été fabriquée avec une perceuse de taille 0,3 mm. Après de multiples essais en modifiant l'ouverture de l'évacuation d'air, nous avons pu constater que l'eau s'échappaient quand même soit en (2), si l'évacuation en (3) était bouchée, soit en (3) si l'évacuation n'était pas bouchée.



### 4.2.2 Validation numérique

Afin d'effectuer la validation numérique, le choix de l'article de M. Héту et al. [61] s'est fait naturellement : cet article traite de plusieurs géométries auxquelles on injecte un polymère thermoplastique fondu, ce qui se rapproche de notre application. De plus, cet article est celui qui donne le plus d'informations sur les résultats qu'ils ont obtenus et les paramètres qui ont été sélectionnés.

#### 4.2.2.1 Cas test

Avec les données de notre modèle numérique et les conditions aux limites, géométrie et résultats de M. Héту, nous avons lancé des simulations afin de vérifier sa validité.

Comme le montre la figure 4.14, la géométrie de M. Héту est plutôt simple : elle consiste en un parallélépipède rectangle représentant un tuyau dans lequel on injecte un polymère thermoplastique fondu par l'une des extrémités. L'écoulement est considéré comme entièrement développé à l'entrée et les conditions aux limites sont précisées dans le schéma de l'article (Voir figure 4.14).

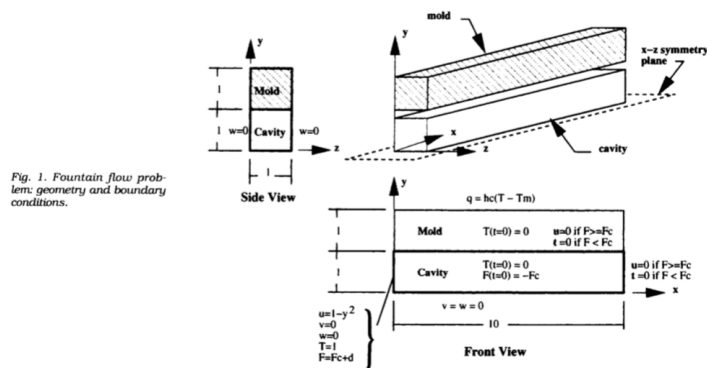


FIGURE 4.14 – Géométrie et donnée de l'article de J.F. Héту et al. [53]. Leur géométrie consiste en une simple cavité de moule rectangulaire simulée en deux dimensions.

La simulation COMSOL développée pour le projet principal a été reprise et appliquée à la géométrie et aux données de l'article de M. Héту.



### Conditions aux limites

En accord avec l'article de M. Hétu, la figure 4.15 présente donc les conditions aux limites appliquées à notre simulation.



FIGURE 4.15 – Conditions aux limites du cas test présentées sur un schéma de ce dernier.

Comme représenté sur la figure 4.15 :

- En 1, nous avons l'entrée avec une vitesse récupérée dans l'article de M. Hétu, à savoir une vitesse moyenne  $U_0 = 1 - y^2 \text{ m.s}^{-1}$
- En 2, nous avons la paroi avec la condition de non glissement
- En 3, nous avons l'interface entre l'air et le polymère. Le polymère est dans la partie gauche à l'instant initial, et l'air remplit le reste de la cavité.
- En 4, la sortie a une condition de pression fixé à  $p_0 = 0 \text{ Pa}$
- Enfin, en 5, nous avons une condition de symétrie, ce qui signifie que nous allons étudier uniquement la partie supérieure de la géométrie, car la partie inférieure a les mêmes caractéristiques que la partie supérieure.

#### 4.2.2.2 Indépendance du maillage et du pas de temps

Une fois la simulation COMSOL mise en place, afin de vérifier que la simulation soit correcte, une étude de l'indépendance du maillage et du pas de temps par rapport à la solution a été faite.

Pour cela, la vitesse a été prise en un point indiqué dans la figure 4.16 suivante.

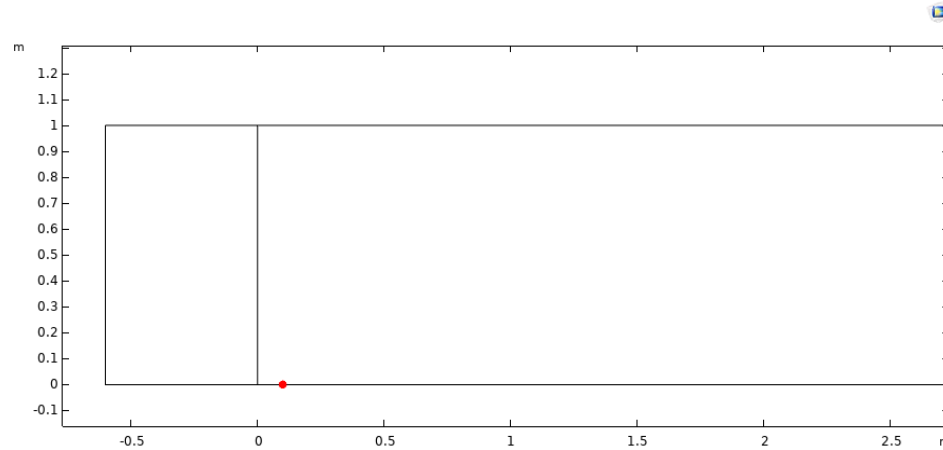


FIGURE 4.16 – Point de coupe pour le cas test.

### Indépendance du maillage

Afin d'étudier l'indépendance du maillage, quatre maillages ont été testés, et nous avons comparé les résultats de vitesse obtenus pour chacun d'entre eux.

Dans la table 4.7, nous présentons les différents maillages testés. Ce tableau présente les différentes propriétés intéressantes pour les maillages Fin, Normal, Grossier et Très Grossier testés, à savoir : les tailles maximales et minimales de chaque éléments, le nombre d'éléments dans chaque maillage, la qualité moyenne de ces éléments et enfin le temps de calcul nécessaire pour que la simulation soit complète.

TABLE 4.7 – Propriétés des différents maillages testés pour le cas test

|                              | Fin      | Normal   | Grossier | Très grossier |
|------------------------------|----------|----------|----------|---------------|
| Taille maximale des éléments | 0.035 mm | 0.045 mm | 0.067 mm | 0.13 mm       |
| Taille minimale des éléments | 0.001 mm | 0.002 mm | 0.003 mm | 0.005 mm      |
| Nombres d'éléments           | 26752    | 17130    | 8602     | 2964          |
| Qualité moyenne des éléments | 0.9195   | 0.9107   | 0.883    | 0.8666        |
| Temps de calcul              | 2h12min  | 1h23min  | 29min5s  | 12min59s      |

Comme dit précédemment les vitesses obtenues au point de coupe ont été comparée pour chaque maillage et les résultats obtenus sont les suivants :

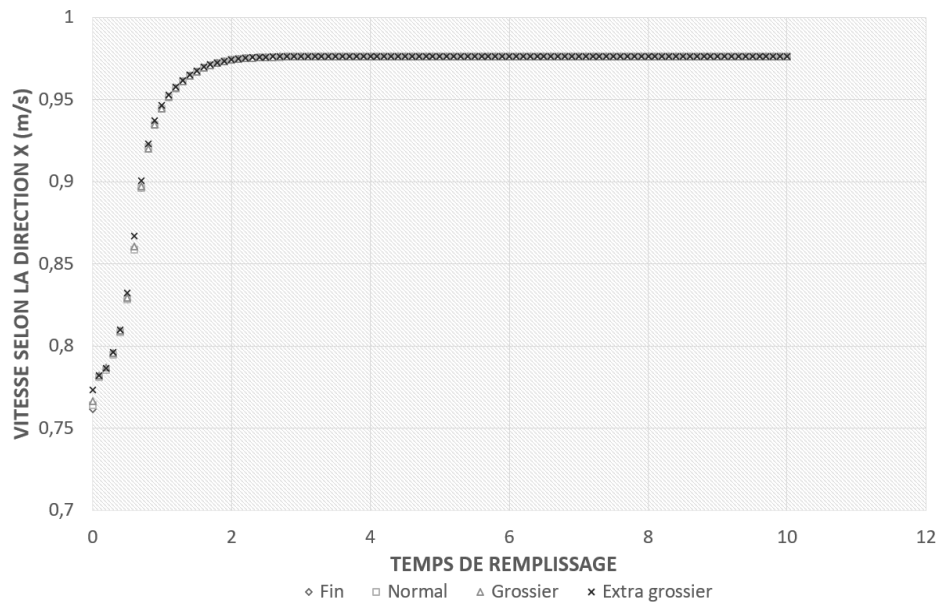


FIGURE 4.17 – Comparaison des vitesses obtenues avec chaque maillage dans COMSOL 5.4<sup>®</sup>. Les vitesses obtenues ont été testées pour les maillages Fin, Normal, Grossier et Très Grossier sur COMSOL Multiphysics 5.4<sup>®</sup>

Nous pouvons observer dans la figure 4.17 que les résultats de vitesse sont similaires quel que soit le maillage testé. Nous obtenons donc une courbe où une grande partie des points sont confondus. Ceci nous permet d'en déduire que notre simulation est indépendante de son maillage. Pour des raisons de facilité et rapidité de simulation, le maillage normal a été sélectionné pour la suite des simulations, car celui-ci est assez précis pour notre étude et n'est pas aussi long en temps de calcul que pour le maillage fin.

### Indépendance du pas de temps

Plusieurs pas de temps ont été testés afin de vérifier l'indépendance de la solution par rapport au pas de temps. Les différents pas de temps testés sont : 0,001 s, 0,01 s et 0,1 s. Les résultats de vitesse au point de coupe présenté plus haut ont ensuite été comparés afin de déterminer l'indépendance. La figure ?? présente donc les courbes de vitesse obtenues

pour chaque pas de temps testés.

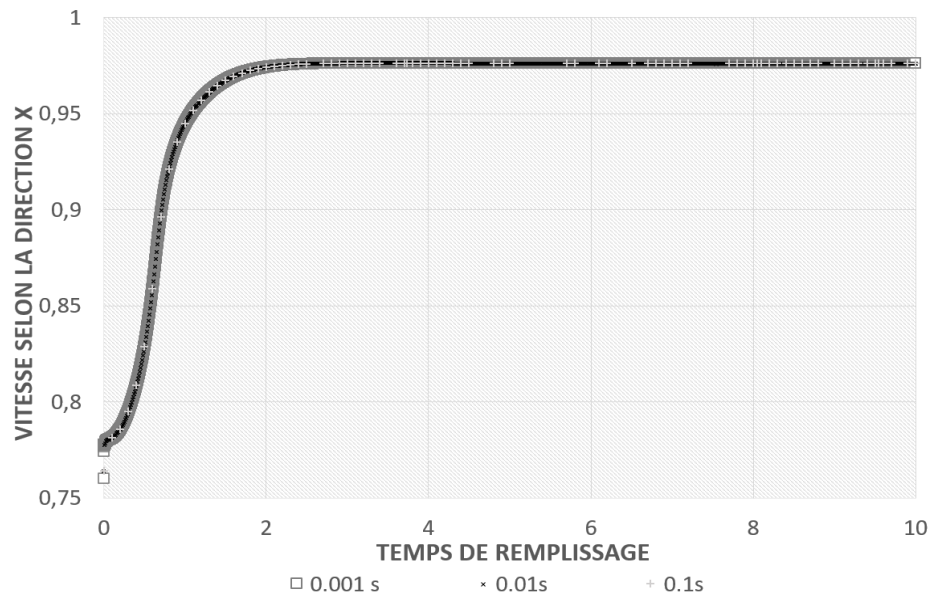


FIGURE 4.18 – Comparaison des vitesses obtenues avec chaque pas de temps dans COMSOL 5.4®. les pas de temps testés sont : 0,001 s, 0,01 s et 0,1 s.

Nous pouvons observer grâce à la figure ?? que les vitesses obtenues pour chaque pas de temps sont les mêmes. La solution est donc bien indépendante du pas de temps et nous pouvons sélectionner le pas de temps à 0,1 s pour lancer nos simulations désormais.

#### 4.2.2.3 Paramètres du solveur utilisé

Afin de lancer cette simulation, on utilise une simulation temporelle ayant pour paramètres ceux présentés dans la table 4.8 :

TABLE 4.8 – Paramètres du solveur utilisé

| Paramètres du solveur |       |
|-----------------------|-------|
| Temps initial         | 0 s   |
| Temps final           | 1 s   |
| Pas de temps          | 0.1 s |

Ces paramètres ont été sélectionnés en accord avec les résultats de l'indépendance du maillage et afin d'obtenir le résultat le plus cohérent possible.

#### 4.2.2.4 Résultats du cas test

Les résultats fournis par l'article de recherche étant essentiellement des résultats de fraction volumique de fluide et de vitesse, ces derniers ont été comparés qualitativement et quantitativement aux résultats obtenus avec COMSOL Multiphysics.

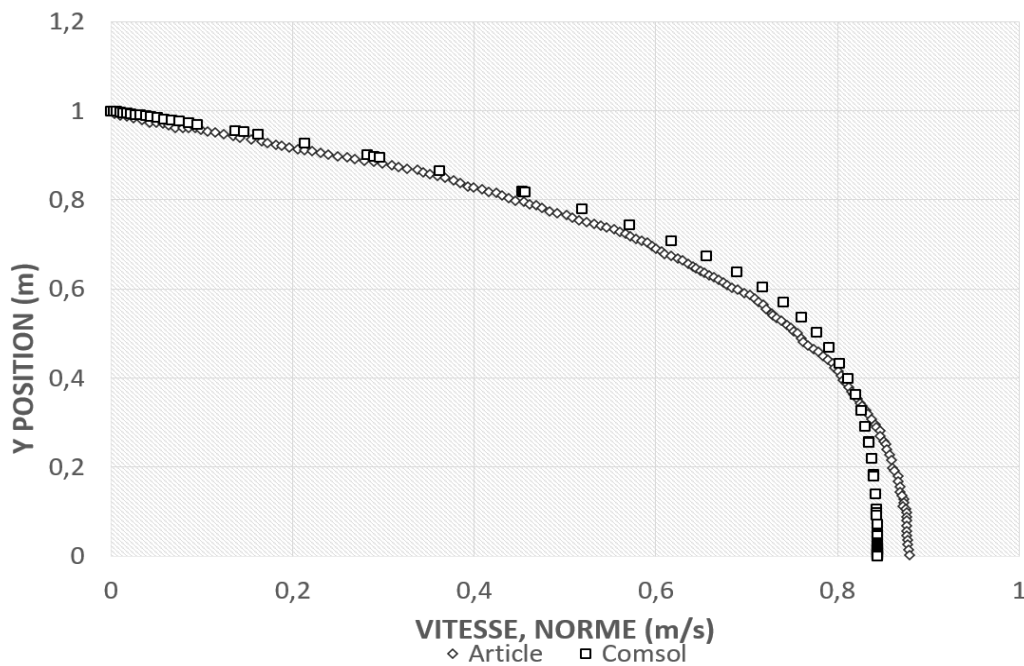


FIGURE 4.19 – Comparaison des courbes de vitesse obtenues entre COMSOL et l'article de J.F. Héту et al. □ : Résultats de vitesse obtenus à l'issue de notre simulation. ◇ : Données de vitesses fournies dans l'article.

Dans la figure 4.19, nous pouvons observer la courbe de carrés noirs correspondant aux résultats obtenus avec la simulation COMSOL, comparés à la courbe en losange plus clairs des résultats obtenus avec les données de l'article de M. Hetu et al. Nous constatons que les courbes de vitesse des deux sources se superposent, ce qui est très encourageant pour notre étude.

De plus, la fraction volumique de fluide que l'on peut voir dans la figure 4.20 semble

présenter des résultats semblables à ceux obtenus dans l'article de M.Hétu et al. En effet, le profil de fraction volumique obtenu à l'issue de la simulation est le même que celui observé dans l'article de M. Hétu et al. à l'instant  $t = 6$  s. Ceci est également un bon point en faveur de notre modèle de fluide.

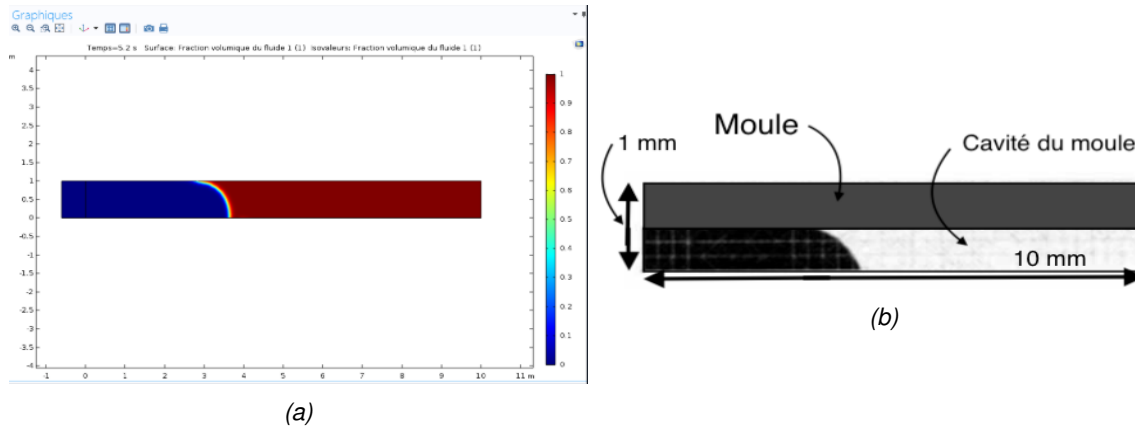


FIGURE 4.20 – Comparaison des fractions volumique entre l'article et la simulation COMSOL. (a) : Fraction volumique de fluide de la simulation. (b) : Fraction volumique de fluide dans l'article [53].

Il semble donc que cet article nous ait permis de voir que notre modèle nous permet d'obtenir des résultats similaires tant d'un point de vue qualitatif, comme nous avons pu le voir avec la figure 4.20, que d'un point de vue quantitatif, comme nous avons pu le voir avec la figure 4.19. Ceci concourt à un résultat favorable à la validation de notre modèle principal.

### 4.3 Résultats obtenus avec COMSOL 5.4

L'ensemble des simulations faites avec COMSOL 5.4<sup>®</sup> a consisté à suivre les modèles développés à l'aide des différents articles et de la littérature sur COMSOL 5.4<sup>®</sup> [85].

Après lecture et sélection des modèles mathématiques et des méthodes les plus adaptées à notre projet, la simulation avec COMSOL Multiphysics 5.4<sup>®</sup> a été travaillée afin d'observer le comportement du fluide au sein des microtextures.

### 4.3.1 Écoulement isotherme au sein du moule

#### Géométrie

Avec COMSOL Multiphysics 5.4<sup>®</sup>, nous nous intéressons au comportement du fluide dans les microtextures. Afin de diminuer les temps de calculs et faciliter le suivi du front d'écoulement, il a été décidé que, dans un premier temps, la simulation se ferait en deux dimensions, avec des textures rectangulaires de taille 0,2 mm, comme le montre la figure 4.21. Cette taille de texture a été choisie car selon une grande partie des articles consultés, et notamment l'article de Surace et al. [75], une dimension de 0,2 mm est la limite supérieure de l'échelle microscopique. Les géométries de taille inférieure ou égale à 0,2 mm pourraient donc être considérées comme microscopique. La géométrie sélectionnée pour simuler numériquement le moulage à injection et le remplissage des textures sur COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> est une géométrie purement 2D. La partie simulée dans un premier temps avec COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> est de largeur  $l = 3,02$  mm. Nous avons donc simulé l'entrée d'injection et jusqu'à 3 mm de la jupe de l'isolateur afin d'observer le comportement du polymère avec COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>.

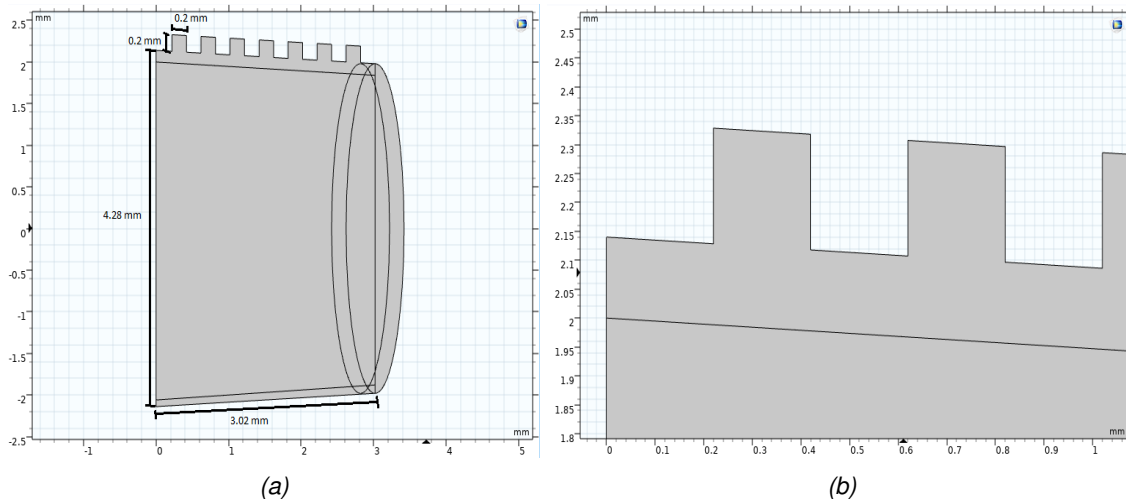


FIGURE 4.21 – Géométrie avec microtextures sur COMSOL 5.4<sup>®</sup>. (a) : Géométrie sur COMSOL 5.4<sup>®</sup>. (b) : Aspect des microtextures de 0,2 mm

### Conditions aux frontières

Pour ce projet, nous nous sommes basés sur des conditions initiales se rapprochant de celles communément utilisées dans l'industrie, présentée dans la table 4.9 :

TABLE 4.9 – Conditions initiales proches de celles utilisées dans les systèmes d'injection

| Conditions initiales du projet fournies par l'entreprise                  |
|---|
| Vitesse d'injection : $u = 8 \text{ mm.s}^{-1}$                           |
| Pression d'injection : $p = 1e^{+7} \text{ Pa}$ (100 bar)                 |
| Température du moule : $T_m = 152^\circ\text{C}$                          |
| Température du polymère : $T_p = 20^\circ\text{C}$ (température ambiante) |

Nous avons donc ensuite créé notre modèle en accord avec ces conditions initiales. Ainsi, nous avons sélectionné les différentes frontières comme on peut le voir sur la figure 4.22, puis nous avons appliqué les conditions suivantes pour notre géométrie :

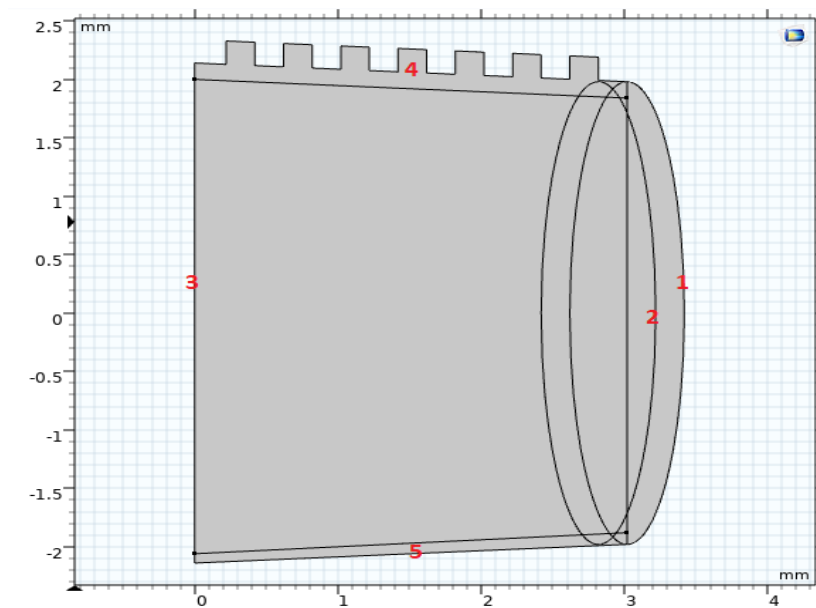


FIGURE 4.22 – Conditions appliquées aux frontières de la partie de l'isolateur simulée avec COMSOL Multiphysics 5.4<sup>®</sup>



Pour ce projet, les conditions appliquées à chaque frontière sont les suivantes pour l'écoulement laminaire et la méthode des ensembles de niveaux :

- En 1, nous avons l'entrée du fluide. COMSOL permet d'imposer plusieurs types de condition à l'entrée : une condition de vitesse, de pression, ou de débit. Pour les premières simulations, il a été décidé d'imposer une condition d'entrée de vitesse telle que  $u_{inlet} = 0.008 \text{ m.s}^{-1}$ , vitesse qui se rapproche le plus de celles utilisées dans l'industrie, en tant que vitesse d'injection. Nous considérons que l'on fait entrer du LSR par cette frontière, la composante  $\phi$  de l'équation de la méthode des ensembles de niveau est telle que  $\phi = 1$  ;
- La frontière 2 représente l'interface initiale de contact entre l'air et le LSR, qu'il est nécessaire de déterminer avec COMSOL Multiphysics 5.4<sup>©</sup> pour la méthode des ensembles de niveau ;
- La frontière 3 est la sortie pour l'écoulement laminaire et la méthode des ensembles de niveau. La condition appliquée ici est une pression  $p = 0 \text{ Pa}$ , car la condition appliquée en entrée est une vitesse. Nous considérons ici que  $p = 0 \text{ Pa}$  car COMSOL Multiphysics 5.4 travaille avec la pression relative dans le cas des fluides non compressibles et faiblement compressibles. La pression relative utilisée par COMSOL est la pression atmosphérique, c'est à dire que  $p_{ref} = 1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$ .
- La frontière 4 est la frontière où nous retrouvons les microtextures. À cette paroi, une condition de paroi mouillée a été imposée afin de pouvoir appliquer l'angle de contact entre la paroi du moule et le LSR. Celui-ci est considéré comme étant tel que  $\theta = \frac{3\pi}{8} \text{ rad}$ .
- La frontière 5 est la paroi inférieure du moule. Une condition de non glissement a été appliquée à cette paroi.

Certaines hypothèses ont également été choisies afin de faciliter la résolution du problème sur COMSOL Multiphysics 5.4<sup>®</sup> :

- En effet, les matériaux avec lesquels nous travaillons, à savoir le caoutchouc de silicone LSR ou HTV [86], sont des matériaux thermodurcissables et sont donc soumis au phénomène de réticulation lorsqu'ils sont chauffés. Ce phénomène complexifie grandement notre problème, mais il n'apparaît pas dans les premières secondes de remplissage. Afin de faciliter notre problème, il a donc été décidé de considérer que le remplissage de notre géométrie se fait avant que le phénomène de réticulation n'ait lieu. Ainsi, il est possible pour nous d'émettre l'hypothèse que notre matériau a un comportement qui se rapproche de celui des polymères thermoplastiques, et nous pouvons donc commencer par considérer les équations thermiques propres aux polymères thermoplastiques dans un premier temps.
- Il est plus facile de trouver des informations sur les propriétés du LSR ou de l'EPDM, qui présentent tous deux des propriétés très similaires au silicone HTV. Les différences majeures entre ces matériaux sont que :
  - Le LSR est moins visqueux que le HTV
  - Le EPDM est moins résistant aux températures élevées auxquelles l'élastomère de silicone HTV résiste

Ainsi, ces deux matériaux sont privilégiés pour nos simulations avec COMSOL Multiphysics 5.4<sup>®</sup> et Autodesk Moldflow<sup>®</sup>.

- Dans le moulage à injection, en général, le polymère est acheminé dans le moule à l'aide de tuyaux placés à des endroits stratégiques du moule. L'entrée de notre géométrie correspond également la sortie de l'un de ces tuyaux. Par conséquent, une

hypothèse faite pour ce projet est que l'écoulement est déjà entièrement développé au niveau de l'entrée du moule.

- Le processus de chauffage et de remplissage de notre moule s'effectue comme suit : tout d'abord, le moule est chauffé jusqu'à ce qu'il atteigne une température de 152° C (425,15 K). Ensuite, l'élastomère à température ambiante est injecté dans le moule. Ceci permet de retarder le chauffage de l'élastomère et ainsi de retarder le déclenchement de la réticulation de ce dernier.

## Matériaux

Afin de travailler avec les matériaux qui nous intéressent, à savoir des élastomères thermodurcissables, ceux sélectionnés pour simuler numériquement le moulage à injection de polymère sont :

- l'air, matériau pris dans la bibliothèque COMSOL Multiphysics 5.4<sup>®</sup> et qui représente le fluide qui se trouve dans la cavité du moule à l'état initial
- l'élastomère de silicone liquide (Liquid Silicone Rubber, LSR), qui présente des propriétés très similaires au matériau que l'on veut utiliser pour notre projet, le caoutchouc de silicone HTV (High Temperature Vulcanized). La différence notable entre ces deux matériaux réside dans leur viscosité. Nous avons auparavant considéré le LSR et l'EPDM comme matériau d'intérêt pour notre simulation, mais après plusieurs discussions et comparaison des caractéristiques de chaque matériau, il a été décidé d'effectuer les simulations avec le LSR.

À l'aide de la bibliothèque de matériau de Moldflow Insight<sup>®</sup> ainsi que du site internet Matweb [87], les propriétés du LSR ont pu être rassemblées et estimées afin de pouvoir lancer les simulations sur COMSOL 5.4<sup>®</sup>. Nous pouvons les retrouver dans la table 4.10

suivant :

TABLE 4.10 – Propriétés du LSR [78]

| Propriétés du LSR sélectionnées pour les simulations                            |
|---|
| Densité : $\rho = 1100 \text{ kg.m}^{-3}$                                       |
| Viscosité dynamique : $\mu = 120 \text{ Pa.s}$                                  |
| Module de Young : $E = 25e^{+6} \text{ Pa}$                                     |
| Coefficient de Poisson : $\nu = 0,48$   |
| Conductivité thermique : $k_{iso} = 0,180 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$              |
| Coefficient d'expansion thermique : $\alpha_{iso} = 280e^{-6} \text{ K}^{-1}$   |
| Capacité thermique à pression constante : $C_p = 1,26 \text{ J.kg}^{-1}.K^{-1}$ |
| Ratio des chaleurs spécifiques : $\gamma = 0,2$                                 |
| Module de cisaillement : $G = 3e^{+5} \text{ N.m}^{-2}$                         |
| Tension de surface air/LSR : $\sigma = 0,023 \text{ N.m}^{-1}$                  |

### Indépendance du maillage et du pas de temps

Le maillage choisi pour ce modèle est un maillage composé d'éléments triangulaires, qui convient mieux à une simulation en dynamique des fluides. Dans un premier temps l'option couche limite de COMSOL a été utilisée pour les simulations. Cependant cette option créait des éléments de maillage déformés et ne donnant pas d'informations assez précise sur le comportement du fluide au niveau des parois. Le maillage a donc été raffiné manuellement au niveau des parois afin de capter correctement la couche limite du fluide, ainsi que le comportement de l'interface lorsqu'elle rencontre des microtextures.

Afin de vérifier la validité de notre modèle, une étude sur l'indépendance du maillage et

de la solution a été faite, ainsi qu'une étude sur l'indépendance du pas de temps et de la solution.

### Indépendance du maillage

Pour évaluer l'indépendance du maillage, des courbes et valeurs de vitesse ont été sélectionnées et évaluées sur COMSOL 5.4<sup>®</sup> afin de vérifier si l'on obtient les mêmes valeurs quel que soit le maillage. Dans la figure 4.23, on peut voir la ligne de coupe et le point de coupe qui ont été choisies pour évaluer l'indépendance du maillage.

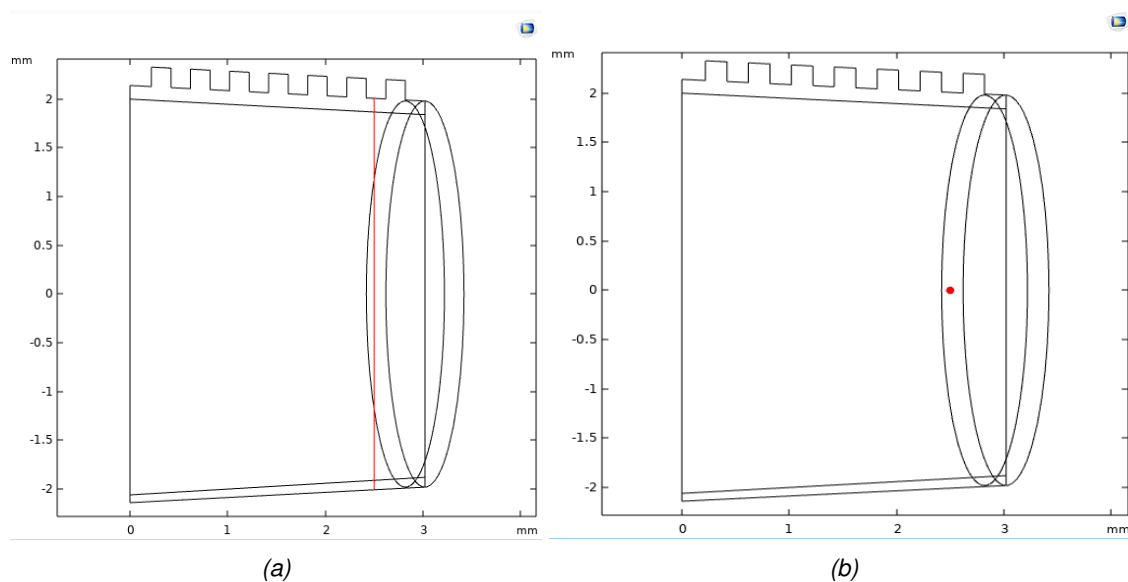


FIGURE 4.23 – Ligne et point de coupe où l'on récupère les profils et valeurs de vitesse. (a) : Ligne de coupe. (b) : Point de coupe.

Quatre tailles de maillage ont été testées : Un maillage très fin, fin, normal et grossier. Les différentes valeurs de ce maillage sont présentées dans la table 4.11. Dans cette table, nous pouvons voir les tailles minimales et maximales des éléments qui composent le maillage, le nombre d'éléments de chaque maillage, la qualité moyenne du maillage et enfin, le temps de calcul de chaque maillage.

TABLE 4.11 – Propriétés des différents maillages testés

|                              | Plus fin        | Fin        | Normal     | Grossier   |
|------------------------------|-----------------|------------|------------|------------|
| Taille maximale des éléments | 0,165 mm        | 0,237 mm   | 0,299 mm   | 0,447 mm   |
| Taille minimale des éléments | $5,59e^{-4}$ mm | 0,00134 mm | 0,00134 mm | 0,00894 mm |
| Nombres d'éléments           | 13774           | 12467      | 12449      | 11569      |
| Qualité moyenne des éléments | 0,8809          | 0,8759     | 0,8751     | 0,867      |
| Temps de calcul              | 2h12min         | 13min      | 19min18s   | 11min50s   |

Afin de vérifier l'indépendance du maillage, il a été décidé de se fixer les points sur la figure précédente 4.23 et d'évaluer la vitesse en ces points.

Une fois les simulations lancées, un graphe de comparaison des vitesses obtenues avec COMSOL 5.4<sup>®</sup> pour chaque maillage dans la figure 4.24 nous permet de constater qu'il n'y a pas de différence notable entre les vitesses obtenues avec les quatre maillages testés :

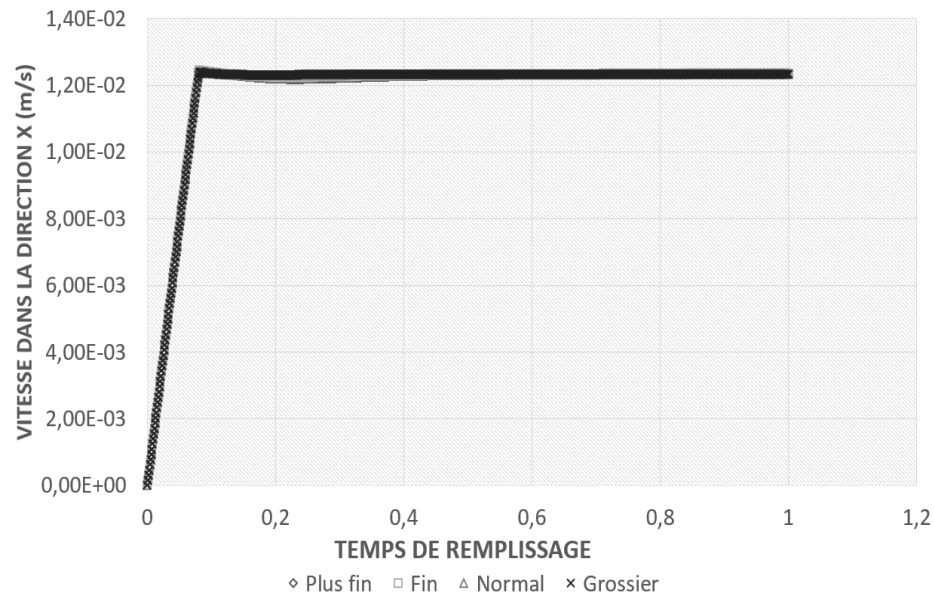


FIGURE 4.24 – Comparaison des vitesses obtenues avec chaque maillage dans COMSOL 5.4<sup>®</sup> au point de coupe présenté en figure 4.23b.

Nous pouvons donc observer que les vitesses sont toujours les mêmes quel que soit

le maillage utilisé : en effet, l'ensemble des courbes présente une vitesse qui augmente progressivement de  $u = 0 \text{ mm.s}^{-1}$  jusqu'à une vitesse maximale d'environ  $u = 12 \text{ mm.s}^{-1}$  entre  $t = 0 \text{ s}$  et  $t = 0,1 \text{ s}$ . Les courbes sont également toutes similaires entre  $t = 0,1 \text{ s}$  et  $t = 1 \text{ s}$  où elles sont à une vitesse maximale d'environ  $u = 12 \text{ mm.s}^{-1}$ . Nous pouvons en déduire que notre modèle est indépendant de notre maillage.

Pour la suite de ce projet, le maillage sélectionné est le maillage fin, car il est un bon compromis entre la rapidité de résolution et la précision du maillage, qui est une donnée intéressante à considérer pour l'évaluation de l'interface entre l'air et le LSR.

Le maillage sélectionné pour notre projet a été raffiné au niveau des parois afin d'observer la couche limite entre le liquide et les parois. Le maillage final obtenu pour les simulations de notre géométrie principale est donc présenté dans la figure 4.25 :

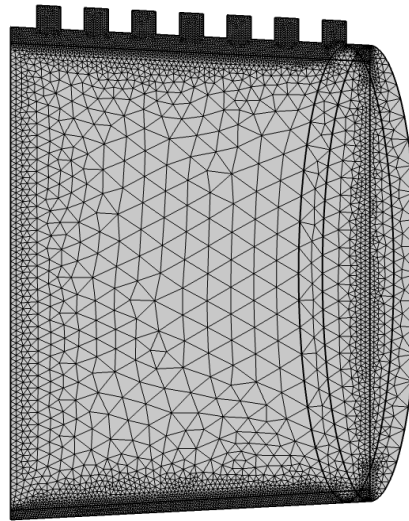


FIGURE 4.25 – Maillage fin raffiné aux parois de notre géométrie.

### Indépendance du pas de temps

De même que pour le maillage, une étude de l'indépendance du pas de temps a été effectuée. Pour cela, trois pas de temps ont été testés :  $0,001 \text{ s}$ ,  $0,01 \text{ s}$  et  $0,1 \text{ s}$ . Les résultats de vitesse au point de coupe de la figure 4.23b ont été récupérés :

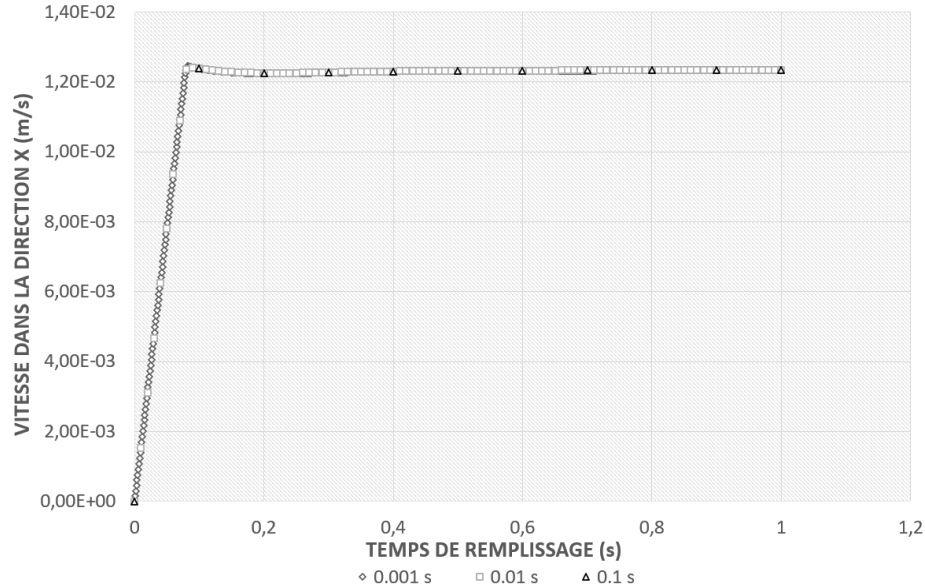


FIGURE 4.26 – Comparaison des vitesses obtenues avec chaque pas de temps dans COMSOL 5.4<sup>®</sup>. Les pas de temps testés sont les pas de temps 0,001 s, 0,01 s et 0,1 s.

Nous observons donc sur la figure 4.26 que les trois pas de temps donnent toujours les mêmes valeurs et profils de vitesse. Nous pouvons donc en conclure que la solution est indépendante du pas de temps choisi.

Pour ce projet, le pas de temps le plus faible, à savoir 0,001 s, a été choisi, car il nous permet d'observer avec plus de précision le comportement du front d'écoulement dans le moule et au niveau des micro-textures.

Dans un premier temps, une simulation avec une température fixe a été mise en place pour ce projet, afin de déterminer les paramètres d'entrée adéquats. Le modèle choisi pour étudier le comportement du fluide dans COMSOL 5.4<sup>®</sup> est un modèle laminaire, et utilise la méthode des ensembles de niveau.

En incluant la gravité et le modèle de faible compressibilité du fluide, notre équation pour l'écoulement laminaire pour une étude temporelle dans COMSOL 5.4<sup>®</sup> devient :



$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla u = \nabla[-p \cdot I_d + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - (\frac{2\mu}{3} \nabla[u]) I_d] \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (4.2)$$

À cette équation de dynamique des fluides est ajouté l'équation de la méthode des surfaces de niveau. Cette dernière est définie comme suit dans COMSOL 5.4<sup>®</sup> :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \nabla[\phi] = \gamma \nabla[\epsilon \nabla[\phi] - \phi(1 - \phi) \frac{\nabla[\phi]}{|\nabla[\phi]|}] \quad (4.3)$$

Ces équations COMSOL Multiphysics 5.4<sup>®</sup> sont comparables aux équations décrites par Moguedet et al. [65] et Zhou Huamin [22] concernant le moulage à injection de polymères. Ces équations ne changent donc pas vraiment si le polymère est un thermoplastique ou un thermodurcissable, ce qui rejoint notre hypothèse (partie 4.3.1) considérant que le comportement de notre matériau thermodurcissable est similaire au comportement d'un matériau thermoplastique avant la réticulation. Les paramètres de réinitialisation  $\gamma$  et celui permettant de contrôler l'épaisseur de la surface  $\epsilon$  sont les paramètres par défaut de COMSOL 5.4<sup>®</sup>.

Le LSR est défini comme le fluide entrant, et l'air comme celui présent dans la cavité du moule à l'instant initial.

Pour cette première partie, la simulation a été lancée et les résultats suivants ont été obtenus.

#### 4.3.1.1 Simulations avec les paramètres proches de ceux utilisées dans l'industrie

##### 4.3.1.1.1 Étude de la vitesse de l'écoulement du fluide

Les graphes 4.27 montrent l'évolution de la vitesse à chaque point de la cavité modélisée

entre  $t=0$  s et  $t=0,5$  s, pour une partie de l'isolateur de longueur 3,02 mm. Dans la figure 4.27a, nous pouvons voir la géométrie de l'isolateur simulé à l'instant  $t=0$ . L'échelle sur la droite de la figure nous présente un gradient de couleur allant de  $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (en bleu) à  $12\cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (en rouge).

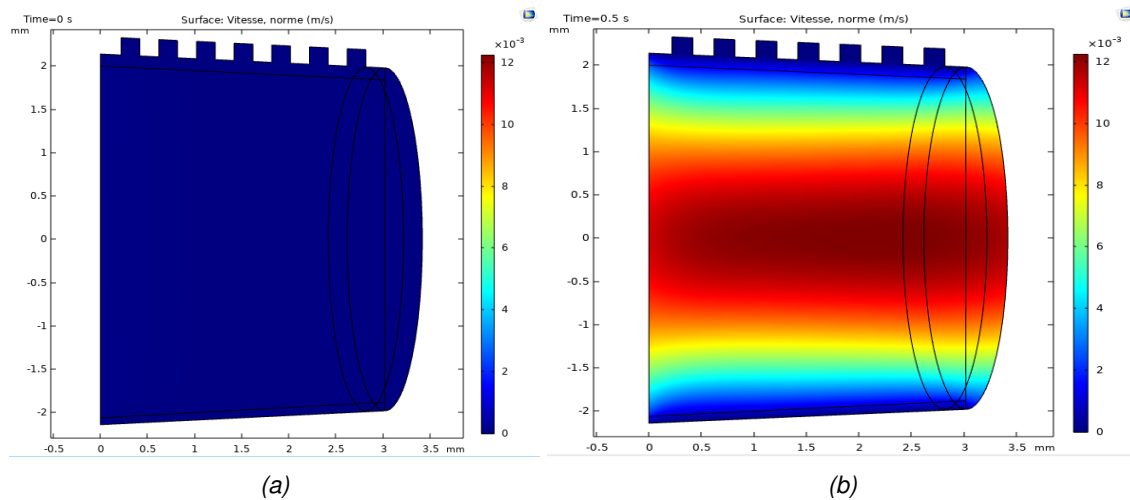


FIGURE 4.27 – Évolution de la vitesse du fluide au sein du moule entre  $t=0$  s et  $t=0,5$  s. (a) : Vitesse du fluide à  $t=0$  s. (b) : Vitesse du fluide à  $t=0,5$  s

À  $t=0$  s, nous observons dans cette figure que la vitesse est nulle dans la totalité du moule, ce qui est pertinent. À  $t=0,5$  s, nous observons un gradient de vitesse dans la figure, avec une vitesse maximale d'environ  $12\cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  au centre de la cavité, représenté en rouge, et qui diminue progressivement jusqu'à atteindre une vitesse quasi nulle aux extrémités, en bleu. Nous observons également une évolution de la vitesse assez importante entre l'instant initial et le moment où le fluide est injecté dans la cavité. Ceci entre en adéquation avec les résultats de vitesse présentés par Moguedet et al.[65] dans leurs travaux sur le moulage à injection de microtextures. De plus, les vitesses obtenues restent dans des ordres de grandeur cohérents par rapport à notre vitesse de départ (qui est à  $0,008 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), ce qui constitue un point supplémentaire en faveur de notre modèle pour cette simulation.

Sur la figure 4.28, obtenue en utilisant la même ligne de coupe que précédemment pour l'indépendance du maillage, nous observons également que la vitesse est à son maximum au centre de la cavité du moule, et qu'elle est quasi-nulle aux extrémités de celui-ci, ce qui entre en adéquation avec les différentes conditions aux limites que nous avons imposées au modèle, à savoir la paroi mouillée et le non glissement à la paroi inférieure.

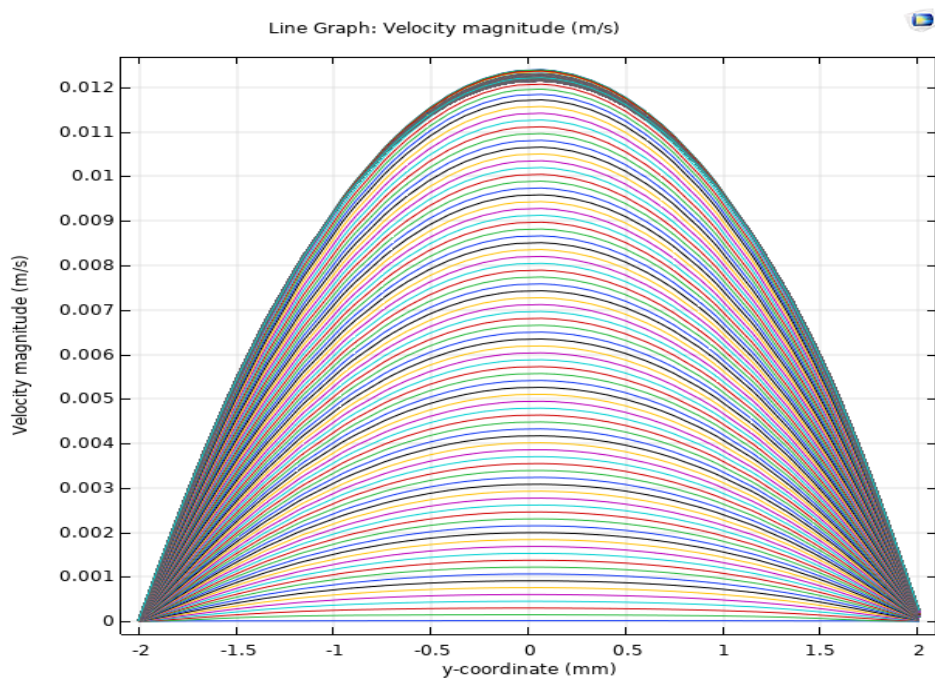


FIGURE 4.28 – Graphe de la norme des vitesses obtenues avec COMSOL 5.4® à la ligne de coupe présentée en figure 4.23a pour chaque pas de temps. Comme précisé plus haut, le pas de temps choisi est à  $0,001s$  pour une durée de remplissage de  $0,5s$

Le résultat de vitesse de notre simulation semble donc plutôt encourageant.

#### 4.3.1.1.2 Étude de la pression dans la cavité

Dans les figures 4.29 plus haut, nous pouvons observer l'évolution de la pression en tout point du fluide, entre  $t=0s$  et  $t=0,5s$ . Dans la figure 4.29a, nous observons uniquement des modifications de la pression au niveau de l'entrée du fluide, et aucune modification de pression dans le reste de la cavité. Il semble donc que la pression ne subit aucune modification

à l'instant initial, ce qui est cohérent. Puis, lorsque le remplissage commence, nous pouvons constater l'apparition de gradient de pression au fur et à mesure du remplissage, jusqu'à atteindre des pressions de l'ordre de  $6,4 \cdot 10^3$  Pa.

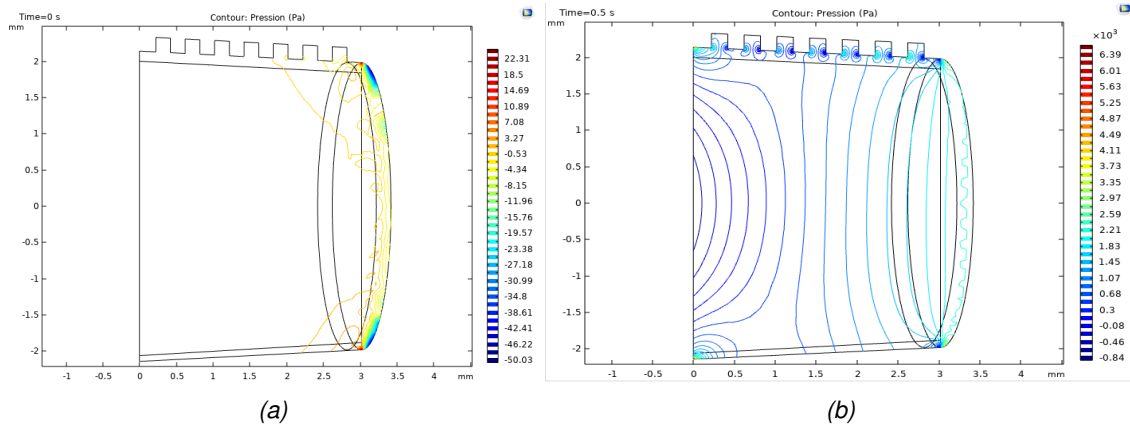


FIGURE 4.29 – Évolution du gradient de pression dans la cavité lors de l'injection. (a) : Pression dans la cavité à  $t=0$  s. (b) : Pression dans la cavité à  $t=0,5$  s

Ces résultats de pression semblent encourageant pour la suite de notre projet mais ils seraient cependant un peu faibles lorsque nous les comparons aux résultats que nous avons obtenus avec Moldflow, qui nous renvoient des ou ceux que nous pouvons trouver dans les articles cités en référence. En effet, les pressions internes à la cavité récupérées à l'aide de Moldflow nous donnent des pressions de l'ordre du MPa, ce qui rend les pressions obtenues ici un peu trop faibles par rapport aux résultats obtenus avec Moldflow.

#### 4.3.1.1.3 Évolution de la fraction volumique de fluide

Ces résultats, illustrés dans la figure 4.30, nous présentent l'évolution de la fraction volumique du fluide entre  $t=0$  s et  $t=0,5$  s dans la cavité du moule. Nous pouvons observer en bleu le LSR, fluide qui va être injecté dans la cavité, et en rouge l'air, qui emplit le moule à l'instant initial.

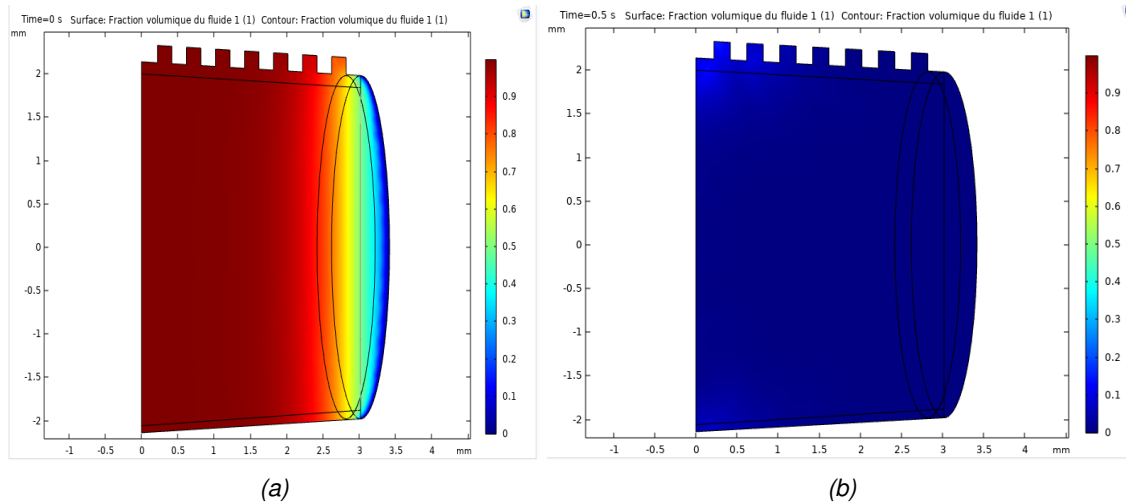


FIGURE 4.30 – Évolution de la fraction volumique de fluide entre l’instant initial  $t=0$  s et le remplissage de la cavité simulée à  $t=0,5$  s. (a) : Fraction volumique de fluide à  $t=0$  s. (b) Fraction volumique de fluide à  $t=0,5$  s

Comme prévu, le LSR, représenté en bleu, n’est pas présent dans la cavité à l’instant initial, mais remplit complètement le moule après 0,5 s, ce qui est cohérent au vu de la vitesse d’entrée de notre simulation ( $u_{inlet} = 0.008 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). En effet, au bout de 0,5 s, une cavité de longueur  $l=3,5$  mm serait déjà remplie par un fluide ayant une vitesse d’entrée de  $0,008 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Nous pouvons observer que le fluide remplit progressivement les textures et un zoom au niveau des textures dans la figure 4.31 nous permet de voir le front d’écoulement du fluide à l’intérieur des textures. En effet, la ligne grise dans cette figure représente le front d’écoulement de notre fluide. Nous observons donc bien que le front d’écoulement du fluide passe dans les textures et les remplit.

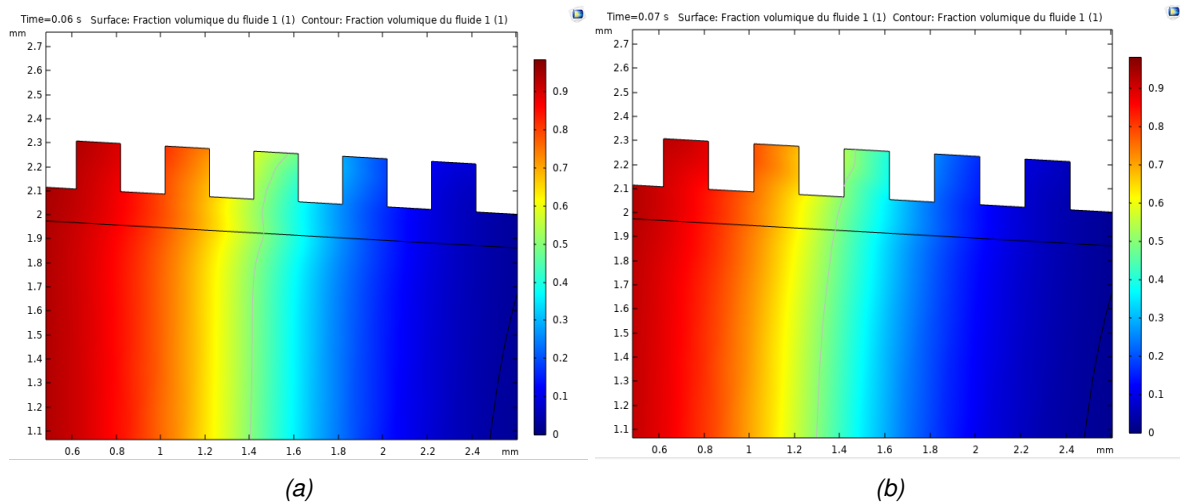


FIGURE 4.31 – Observation du front d'écoulement (ligne grisée) et évolution de ce dernier dans les microtextures de 0.2mm de la géométrie simulée. (a) : Évolution du fluide dans les textures à  $t=0,06$  s. (b) : Évolution du fluide dans les textures à  $t=0,07$  s.

#### 4.3.1.2 Variation des paramètres de la simulation

##### 4.3.1.2.1 Variation des vitesses d'injection

Plusieurs vitesses d'injection ont été testées afin d'observer l'effet de la vitesse d'injection sur le temps de remplissage du moule. Ces dernières sont présentées dans la table 4.12

TABLE 4.12 – Vitesses d'injection testées

| Vitesses d'injection  |                        |
|-----------------------|------------------------|
| Vitesse d'injection 1 | $5 \text{ mm.s}^{-1}$  |
| Vitesse d'injection 2 | $8 \text{ mm.s}^{-1}$  |
| Vitesse d'injection 3 | $10 \text{ mm.s}^{-1}$ |
| Vitesse d'injection 4 | $15 \text{ mm.s}^{-1}$ |

La sélection des vitesses d'injection a été décidée de façon à pouvoir étudier quels sont les effets de la vitesse d'injection si celle-ci est plus petite ou plus grande que celle fournie

par l'entreprise.

Lorsque nous faisons varier les vitesses d'injection dans le moule, nous pouvons observer que celles-ci influent sur le temps de remplissage et la vitesse de remplissage, ce qui est cohérent avec ce que l'on peut constater dans la réalité.

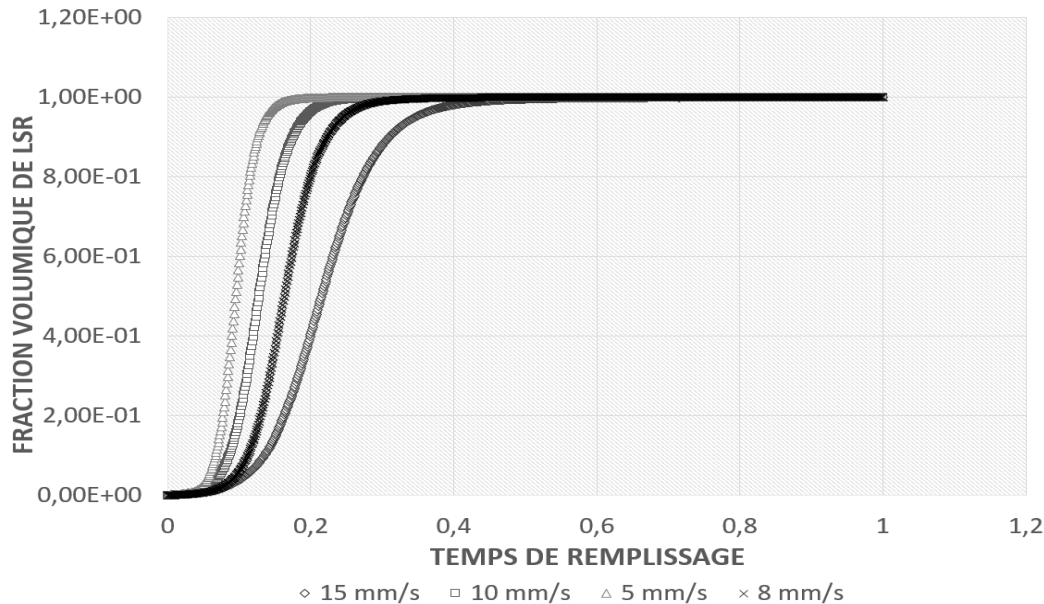


FIGURE 4.32 – Comparaison des fractions volumique de LSR en fonction des vitesses d'injection®. Les vitesses testées ici sont : 5 mm/s, 8 mm/s, 10 mm/s et 15 mm/s.

En effet, dans la figure 4.32, nous pouvons observer que plus la vitesse d'injection est importante, plus le remplissage du moule sera rapide. Ainsi, une vitesse plus basse implique un remplissage moins rapide de la cavité, tandis qu'une vitesse plus grande remplira plus rapidement la cavité. La vitesse d'injection influe donc énormément sur le temps de remplissage du moule, ce qui rejoint les résultats que nous avons obtenu avec Moldflow Insight, mais également les résultats de Gheisari et al. [51] ainsi que ceux de Su et al. [88], qui statuent que la vitesse d'injection est un facteur clé dans la réussite du moulage à injection. Baruffi et al. [57] confirme également qu'une plus grande vitesse d'injection entraîne un remplissage plus rapide et plus efficace de la cavité, cependant, il semble que leurs expériences ont montré une qualité de réplification plus basse avec une haute vitesse d'injection pour un

élastomère thermoplastique.

#### 4.3.1.2.2 Modification des conditions d'entrée et de sortie

Dans un premier temps, une condition d'entrée de vitesse a été considérée pour les simulations. En modifiant la condition d'entrée pour y appliquer une condition de pression, et la sortie pour y appliquer une condition de vitesse, nous observons sur la figure 4.33 que les résultats obtenus sont sensiblement similaires aux simulations précédentes :

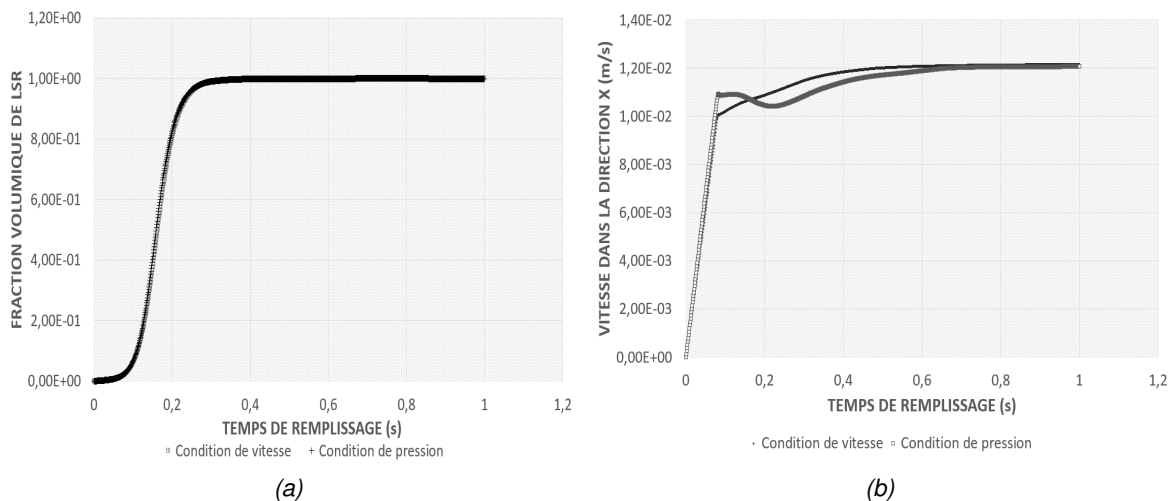


FIGURE 4.33 – Comparaison des résultats obtenus lorsque l'on modifie les conditions d'entrée. (a) : Comparaison des courbes de fraction volumique en fonction des conditions d'entrée de vitesse et de pression. (b) : Comparaison des courbes de vitesse en fonction des conditions d'entrée de vitesse et de pression.

La figure 4.33 nous permet de voir que la fraction volumique de fluide ne change pas en fonction de la condition d'entrée qui a été utilisée. En effet, les courbes de fraction volumique de fluide obtenues pour la condition de vitesse et la condition de pression (figure 4.33a) sont totalement confondues, signifiant ainsi que le remplissage du fluide dans la cavité n'est pas influencé par cette dernière. De plus, le résultat de vitesse de remplissage (figure 4.33b) nous fournit une courbe sensiblement similaire qui nous permet de dire que, bien que la vitesse semble un peu moins stable en ce qui concerne la condition de pression, il n'y a



pas de différence significative dans les valeurs les plus importantes de la courbe, à savoir la vitesse initiale, et la vitesse maximale atteinte au sein de la cavité, qui est de  $12.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ . Ceci nous permet de dire que notre simulation fonctionne de la même façon quelle que soit la condition d'entrée choisie, ce qui est un point encourageant pour notre étude. Nous observons donc que la fraction volumique de fluide est similaire dans les deux situations. Les courbes de vitesse ont sensiblement la même tendance, bien que la vitesse fluctue davantage quand la condition de pression est appliquée en entrée que lorsque c'est la condition de vitesse qui est employée.

Pour les simulations ayant la condition de pression en entrée, nous avons donc choisi les conditions initiales suivantes :

TABLE 4.13 – Conditions aux limites avec pression imposée en entrée

| Conditions initiales  |
|---|
| Condition à l'entrée : $p = 10 \text{ MPa}$                         |
| Vitesse d'injection : $u_{inlet} = 8 \text{ mm.s}^{-1}$             |
| Température du moule : $20^\circ\text{C}$ (Température ambiante)    |
| Température du polymère : $20^\circ\text{C}$ (Température ambiante) |
| Matériau en entrée : LSR  |
| Matériau présent dans le moule à l'instant initial : Air            |

#### 4.3.1.2.3 Variation des pressions d'injection

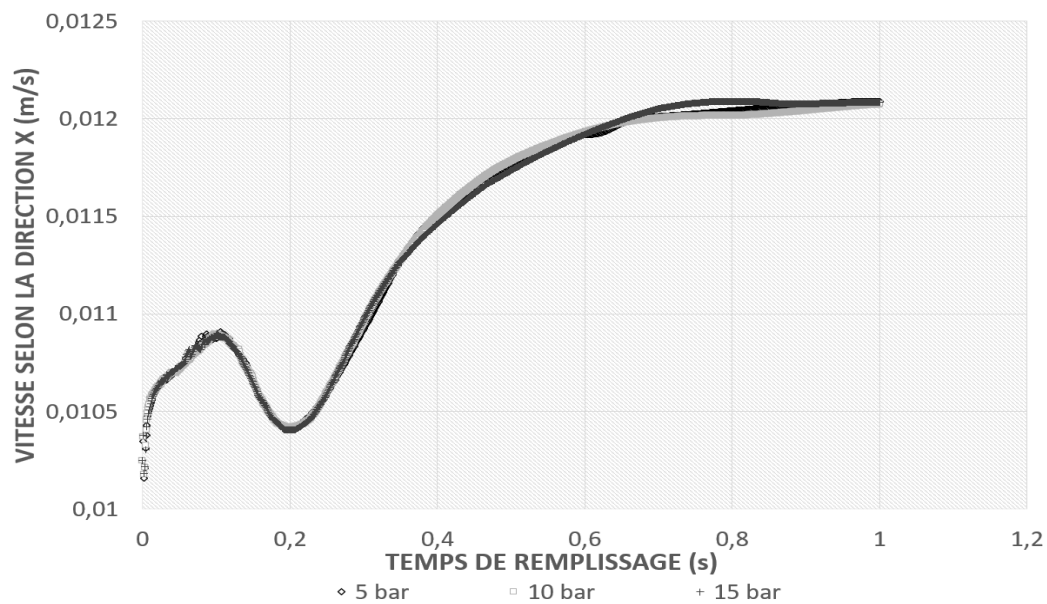
Afin d'observer l'effet de la pression d'injection dans la simulation, trois pressions ont été testées (voir table 4.14).

TABLE 4.14 – Pression d'injection testées

| Pressions d'injection  |        |
|------------------------|--------|
| Pression d'injection 1 | 15 bar |
| Pression d'injection 2 | 10 bar |
| Pression d'injection 3 | 5 bar  |

La pression communément utilisée dans l'industrie est d'environ 10 bar, il est donc intéressant d'observer l'effet de la diminution ou de l'augmentation de la pression sur la simulation.

Nous observons avec la figure 4.34 que les vitesses au point de coupe suivent la même tendance, même si ces dernières sont plus fluctuantes comparées aux vitesses obtenues quand une condition de vitesse est appliquée en entrée.

FIGURE 4.34 – Comparaison des fractions volumique de LSR en fonction du temps de remplissage<sup>®</sup>

Il apparaît donc que la pression d'injection joue un rôle dans le moulage à injection de polymère, mais celui-ci n'est pas aussi significatif que ceux joués par la vitesse d'injection, les températures du moule et du polymère ou encore la pression de compactage, qui apparaît

après le remplissage total du moule et qui n'est donc pas représentée dans cette simulation. Ceci est confirmée par les articles de recherche que nous avons répertoriés dans la partie 2.1 [57, 59, 89]. En effet, ces articles soulignent l'importance de la pression de compactage, c'est à dire de la pression présente dans la cavité une fois que celle-ci est entièrement remplie. Cette pression diffère de la pression d'injection : avec Moldflow<sup>®</sup>, cette pression est représentée au moment du changement entre l'injection et le compactage du polymère.

### 4.3.2 Écoulement thermique au sein du moule

Pour la simulation en température, deux modèles ont été considérés : dans un premier temps le modèle de Carreau pour les fluides non newtoniens, afin d'observer le comportement du fluide et les effets de la température lors de la simulation, puis le modèle de Cross-WLF, qui permet de décrire le comportement d'un polymère thermoplastique lors du moulage à injection et donne ainsi une description plus précise du comportement du polymère.

Le modèle de Cross-WLF est un modèle permettant de décrire le comportement d'un polymère thermoplastique lorsque celui-ci est en présence d'une source de chaleur. Dans ce projet nous avons opté pour ce modèle car l'on considère que le temps de réticulation du polymère thermodurcissable que nous utilisons, c'est à dire le LSR, est plus important que le temps de remplissage de notre géométrie. En effet, notre simulation s'effectue sur une durée se comptant en microsecondes (la géométrie est complètement remplie après 0,7 s en temps réel), tandis que la réticulation du LSR est un processus se mettant en place au bout de plusieurs secondes et qui peut durer jusqu'à plusieurs heures [90].

Comme expliqué dans la partie 4.3.1, le processus de moulage pour notre projet s'effectue comme suit : le moule est chauffé au préalable, puis une fois que celui-ci a atteint la température souhaitée (soit 152 °C, ou 425,15 K), le silicone à température ambiante est

injecté. Garder l'élastomère de silicone à température ambiante permet en effet de ne pas enclencher le processus de réticulation avant que celui-ci ne soit injecté dans le moule.

Pour cela, la simulation a consisté à rajouter une condition de température aux parois, et d'observer ainsi l'évolution de cette dernière dans le moule.

#### 4.3.2.1 Simulations avec le modèle de Carreau non-newtonien

Dans un premier temps, voici les résultats obtenus avec le modèle de Carreau non-newtonien. Ce modèle permet de décrire l'évolution de la viscosité dynamique du fluide en fonction des paramètres de la simulation telle que la vitesse. Ce modèle est également utilisé par Hetu et al. [61] pour lancer leurs simulations de moulage à injection.

L'équation du modèle de Carreau non-Newtonien utilisée par COMSOL est la suivante :

$$\mu = \mu_{inf} + (\mu_0 - \mu_{inf})[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (4.4)$$

Les paramètres pour cette équation ont été récupérés grâce à la librairie de matériau Autodesk Moldflow Insight<sup>®</sup> et le site internet Matweb[87].

##### 4.3.2.1.1 Vitesse

La figure 4.35 nous montre l'évolution de la vitesse au sein de la cavité pour une simulation thermique, c'est à dire lorsque nous avons rajouté la température à notre simulation

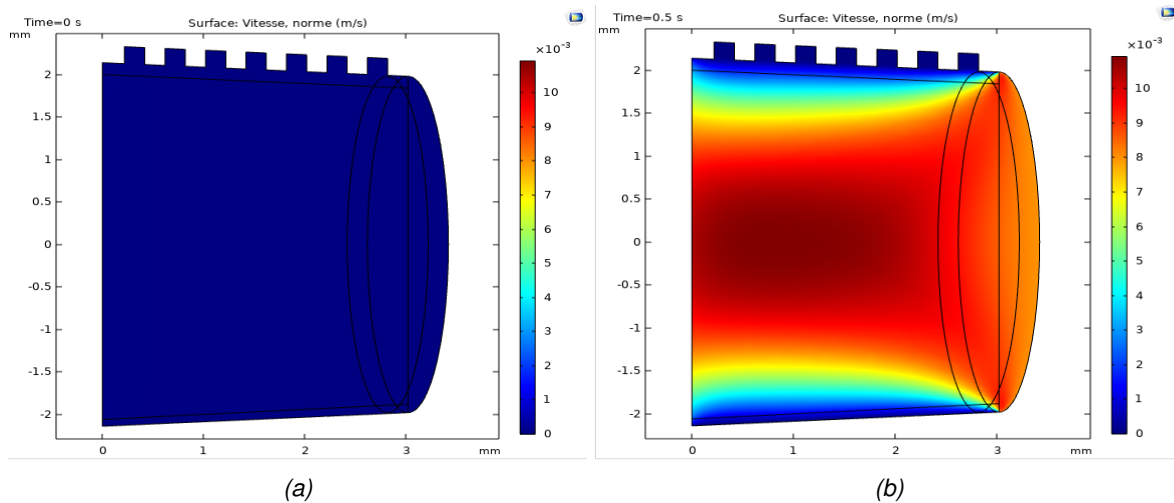


FIGURE 4.35 – Vitesse du fluide dans le moule pour la simulation thermique. (a) : Vitesse du fluide à  $t=0$  s. (b) : Vitesse du fluide à  $t=0,5$  s

Comme précédemment, nous observons l'évolution de la vitesse dans la cavité entre  $t=0$  s et  $t=0,5$  s. En y ajoutant la température, nous observons que le gradient de vitesse diminue moins rapidement que dans les résultats isothermes. La vitesse maximale au sein du fluide, en rouge, semble être légèrement moins importante que dans le résultat isotherme, cependant sa distribution se fait de manière plus équitable que précédemment. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le chauffage de l'élastomère au niveau des parois modifie le comportement et la viscosité de ce dernier : lorsque la température du polymère augmente, la viscosité de ce dernier diminue, il est donc plus facile pour ce dernier de rentrer et remplir la cavité du moule.

En comparant le graphe de vitesse de la simulation isotherme avec celle de la simulation thermique nous observons que les profils de vitesse sont légèrement différents dans la figure 4.36 :

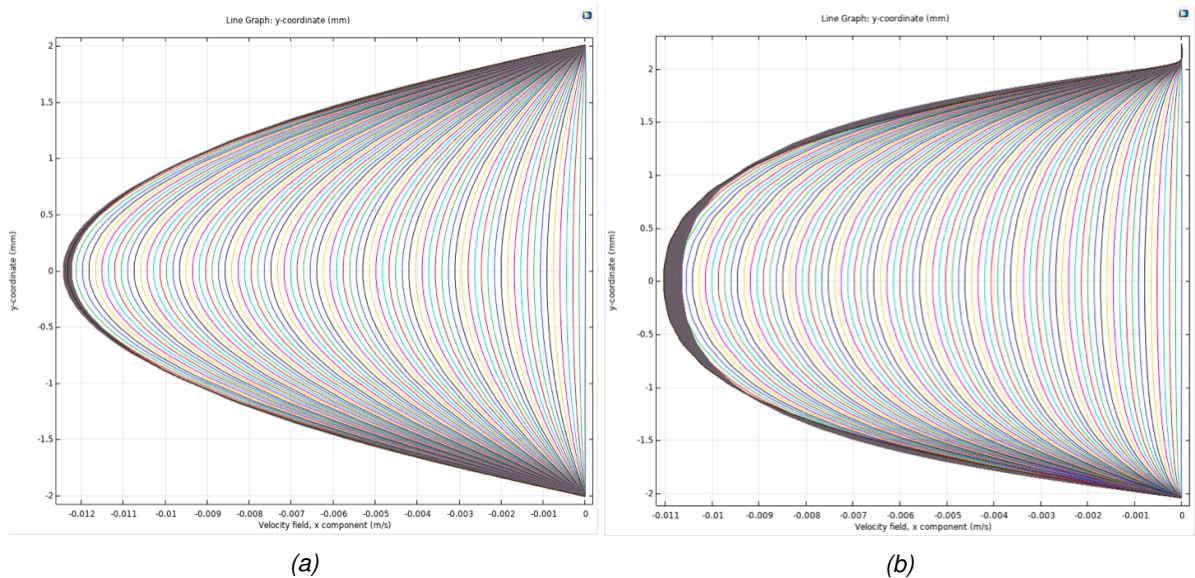


FIGURE 4.36 – Comparaison des profil de vitesse dans les simulations isotherme et thermiques. (a) : Vitesse du fluide dans la simulation isotherme. (b) : Vitesse du fluide dans la simulation thermique.

En effet, le profil dans la simulation thermique suggère que la vitesse maximale à l'intérieur de la cavité est atteinte plus rapidement, comparé à la simulation isotherme, pour laquelle la vitesse maximale est atteinte de manière plus progressive. Cependant nous pouvons observer que la vitesse maximale dans la simulation isotherme atteint environ les  $12.10e^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ , tandis que dans la simulation thermique, la vitesse maximale obtenue avoisine plutôt les  $11.10e^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ .

L'ajout d'un échange de chaleur au sein du moule a ainsi fait évoluer le profil et la distribution de vitesse au sein du moule.

#### 4.3.2.1.2 Fraction volumique de fluide

Lorsque nous observons la fraction volumique de fluide dans la figure 4.37, il semblerait que la géométrie soit complètement remplie quand nous appliquons une température au moule.

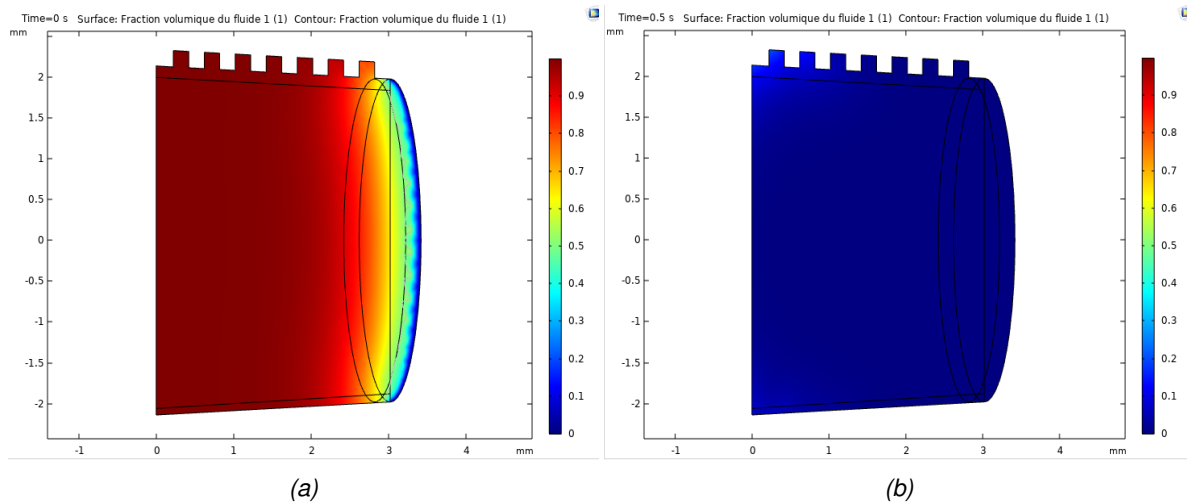


FIGURE 4.37 – Évolution de la fraction volumique de fluide dans la simulation thermique. (a) : Fraction volumique de fluide à  $t=0$  s. (b) : Fraction volumique de fluide à  $t=0,5$  s.

En effet, dans la figure 4.37a, nous observons en rouge l'air qui emplit entièrement la cavité à l'instant  $t=0$  s. L'élastomère de silicone liquide, en bleu, est ensuite injecté dans la cavité et la remplit complètement au bout de 0,5 s. Ceci reste cohérent avec les résultats obtenus dans les parties précédentes.

#### 4.3.2.1.3 Température

Dans la figure 4.38 ci-dessus, nous pouvons observer l'évolution de la vitesse au sein de la cavité entre 0 et 0,5 s. Nous constatons une température équivalente à 152 °C (soit 425,15 K) au sein du moule à l'instant initial, ce qui concorde avec le processus de chauffage du moule utilisé dans l'industrie.

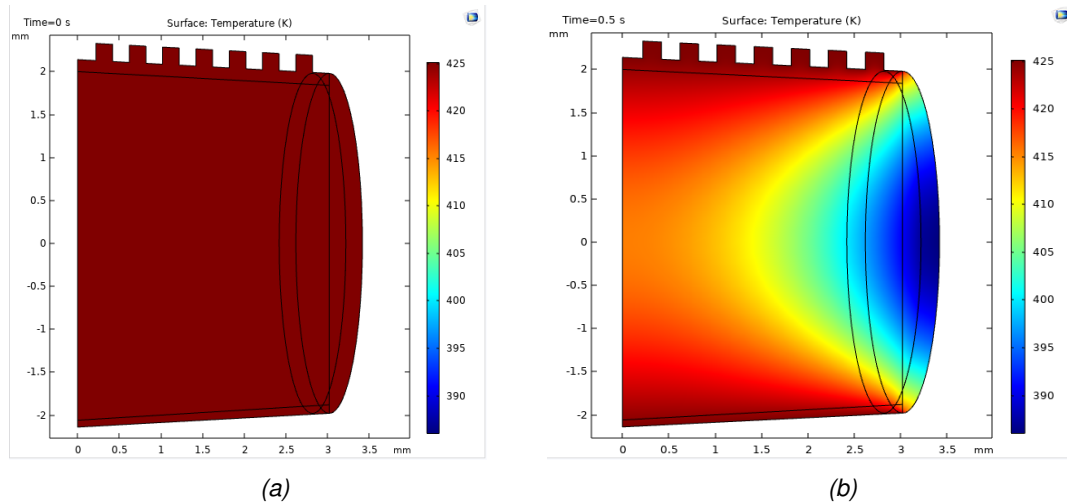


FIGURE 4.38 – Évolution de la température dans le moule. (a) : Température dans le moule à  $t=0$  s. (b) : Température dans le moule à  $t=0,5$  s

Comme expliqué dans le processus d'injection dans la partie 4.3.1, nous observons le remplissage de la cavité une fois que le moule est chauffé à 152 °C, considéré comme l'instant initial à  $t=0$  s, puis ensuite à  $t=0,5$  s, où la cavité est totalement rempli par l'élastomère. Après  $t=0,5$  s, la température s'est propagée des parois jusque dans la cavité du moule avec l'air et le LSR. Nous pouvons observer, ce qui est cohérent, que le coeur du matériau reste à une température plus basse que celle du moule et que progressivement la température du moule vient chauffer le matériau pendant son remplissage. Cependant, il semblerait que la propagation de la température soit un peu rapide pour la durée sélectionnée, à savoir 0,5 s. Il serait intéressant de se demander si la température se propage aussi vite dans la réalité.

#### 4.3.2.2 Variation des températures

Selon plusieurs articles de recherche ([20, 65, 88]...), les températures du moule et du polymère sont des paramètres clés dans la réussite du moulage à injection. Une bonne combinaison de ces paramètres est très importante pour le succès du moulage, mais nous



pouvons nous demander quels sont les effets de ces derniers sur le remplissage.

#### 4.3.2.2.1 Variation de la température du moule

Afin d'observer l'effet de la température du moule sur le remplissage de la cavité, trois températures du moule ont été sélectionnées et présentées dans le tableau 4.15. La température fournie par l'entreprise K-Line Insulators a été choisie comme température de base de la simulation, et des températures plus basses ( $132^{\circ}\text{C}$ ) et plus hautes ( $172^{\circ}\text{C}$ ) ont été testées également afin de voir l'effet de la diminution ou augmentation de la température sur le remplissage. Ces températures ont également été sélectionnées de cette façon car elle correspondait à la fourchette de température conseillée par le logiciel Moldflow lors du moulage à injection de LSR.

TABLE 4.15 – Températures de moule testées

| Température du moule   |                       |
|------------------------|-----------------------|
| Température du moule 1 | $132^{\circ}\text{C}$ |
| Température du moule 2 | $152^{\circ}\text{C}$ |
| Température du moule 3 | $172^{\circ}\text{C}$ |

Nous observons donc l'évolution de la fraction volumique de fluide dans le moule en fonction des différentes températures de moule avec la figure 4.39. Ce graphique nous permet de voir que lorsque la température du moule augmente, il y a une augmentation de la vitesse de remplissage du moule, ce qui rejoint les résultats dans le domaine macroscopique obtenus avec Moldflow Insight. Ce résultat est en partie similaire aux résultats trouvés dans les articles de Matschuk et al. [26] et Maghsoudi et al. [20] : en effet, lorsque la température du moule augmente, la viscosité du polymère diminue et le remplissage du moule est plus rapide.

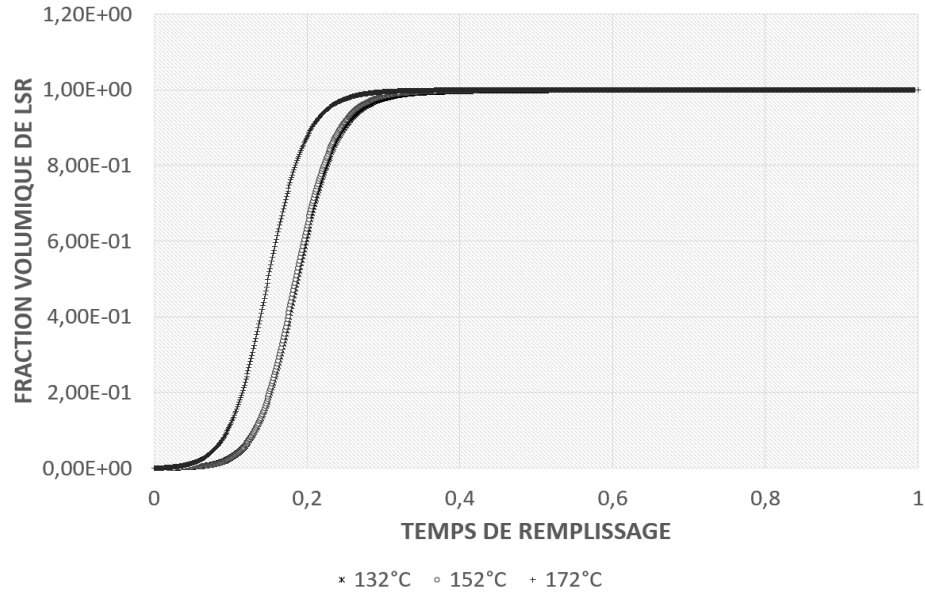


FIGURE 4.39 – Comparaison des fractions volumique de LSR en fonction des températures du moule

#### 4.3.2.2.2 Variation de la température du polymère

De même, plusieurs températures de polymère ont été testées afin d'observer l'effet de la diminution et augmentation de la température du polymère sur le remplissage. Les températures présentées dans la table 4.16 ont été choisis car ils permettent d'observer l'effet de températures au dessus et en dessous de celles communément utilisées dans l'industrie. La température du moule quant à elle est fixée à 152°C.

TABLE 4.16 – Températures de moule testées

| Température du moule |       |
|----------------------|-------|
| Température du LSR 1 | 15 °C |
| Température du LSR 2 | 20 °C |
| Température du LSR 3 | 25 °C |

La figure 4.40 nous permet de voir que la température du polymère semble légèrement influencer sur le temps de remplissage de la cavité, mais de manière moins significative que l'ef-

fet de la température du moule sur le remplissage. Baruffi et al. [57] ont constaté également que l'effet de la température du polymère n'a pas beaucoup d'influence sur le remplissage du moule.

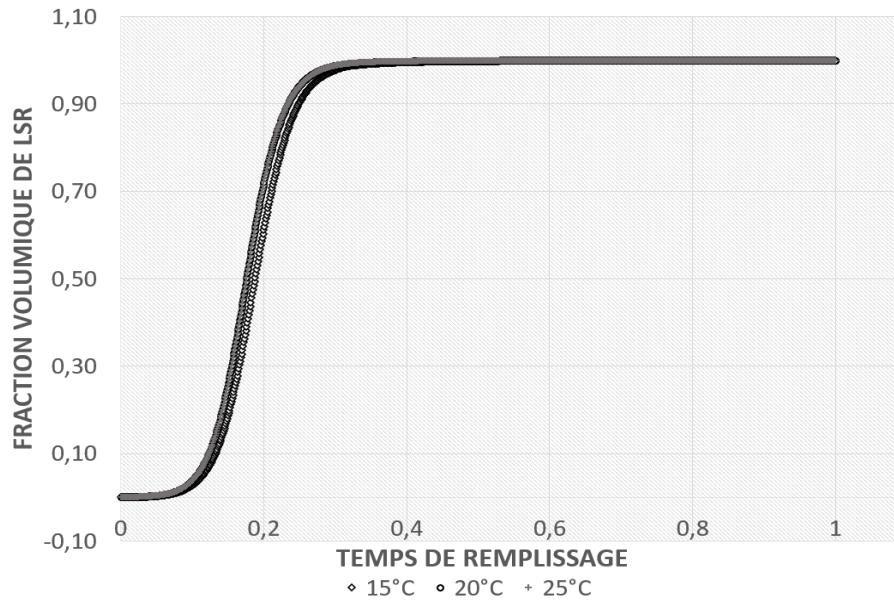


FIGURE 4.40 – Comparaison des fractions volumique de LSR en fonction des températures du polymère

#### 4.3.2.3 Remplissage des micro-textures avec COMSOL

Enfin, le remplissage des textures avec la simulation COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> a été étudié. Pour cela, le remplissage moyen des textures a été évalué dans chaque micro-texture à la fin de la simulation pour chaque températures de moule et de polymère testées.

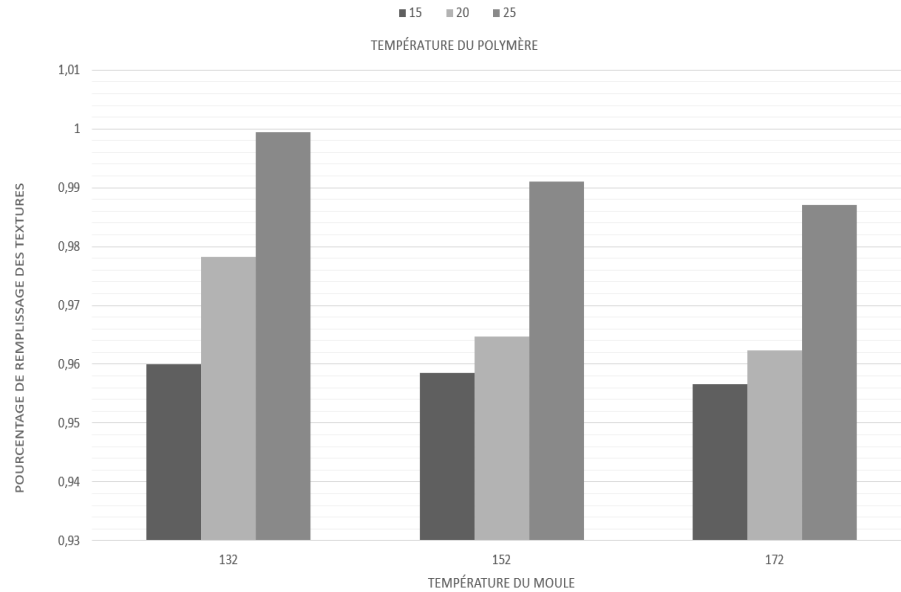


FIGURE 4.41 – Remplissage des textures dans la simulation COMSOL Multiphysics en fonction des températures de moule et de polymère.

La figure 4.41 montre le pourcentage de remplissage des micro-textures dans la simulation COMSOL Multiphysics en fonction des températures du moule et du polymère. Nous pouvons observer que lorsque nous augmentons la température du polymère, le pourcentage de remplissage des textures est plus important. Ainsi, pour les températures de polymère testées, plus ces dernières sont importantes, mieux est le remplissage des textures. Il semblerait cependant que la tendance inverse s'observe lorsque nous augmentons la température du moule : en effet, plus la température du moule augmente, plus le pourcentage de remplissage des microtextures diminue. Ceci nous conforte dans l'idée que les paramètres de température du moule et du polymère ont un effet l'une sur l'autre et influent également sur le pourcentage de remplissage des microtextures. Nous pouvons également voir que les microtextures simulées dans ce projet sont majoritairement remplies au bout de  $t=0,5$  s selon COMSOL Multiphysics.

Nous pouvons observer dans ces résultats que les micro-textures sont remplies au-delà de 90%, tel qu'attendu dans la réalité. Ce résultat se justifie facilement par la proximité de

la porte d'injection : en effet, cette simulation montre les résultats de remplissage de micro-textures se trouvant proches de la porte d'injection, les micro-textures sont donc plus faciles à remplir et le polymère n'a pas encore eu le temps de refroidir et de former la couche solide mentionnée dans l'article de Packianather et al. [31]. De plus, l'article de Maghsoudi et al. [20] parle de la distance de remplissage comme étant un paramètre important dans la réussite du moulage : plus les structures sont proches de la porte d'injection, plus le remplissage des microtextures est meilleur.

De même, nous pouvons observer que plus la température du polymère augmente, plus le pourcentage de remplissage des structures est important, ce qui corrobore les résultats trouvés dans les articles de Lin et al. [34] et Sha et al. [35]. En effet, lorsque la température du polymère augmente, la viscosité de ce dernier diminue et il est donc plus facile de remplir les micro-textures. Nous avons également établi comme hypothèse que le comportement de notre polymère thermodurcissable est similaire à celui d'un polymère thermoplastique lorsque la réticulation n'a pas encore eu lieu.

Nous observons cependant que lorsque la température du moule augmente, le pourcentage de remplissage des microtextures diminue. Cela entre en conflit avec les résultats observés dans les articles de Matschuk et al. [26] ainsi que ceux de Whiteside et al. [27, 28] pour des polymères thermoplastiques. Cependant, dans l'article de revue de Maghsoudi et al. [20], il est mentionné que l'effet de la température du moule est positive pour le remplissage des micro-textures lorsque la température du polymère est basse, et négative lorsque la température du polymère est haute. En effet, dans le cas d'un polymère thermodurcissable, l'augmentation des températures vient avec le risque de provoquer le phénomène de réticulation, phénomène que l'on veut éviter à tout prix lors de la phase de remplissage. De plus, selon un article de Hopmann et al. [58], lorsque les températures du polymère et

du moule sont plus basses dans le moulage à injection d'élastomères thermodurcissables, la viscosité de l'élastomère reste importante et induirait des contraintes au sein du moule. Ces contraintes entraînerait des pressions dans le moule qui faciliterait le remplissage des micro-textures. Les températures de polymère que nous avons testées sont plutôt basse, mais ces résultats nous confirmeraient qu'il est important d'avoir également une température de moule qui n'est pas trop élevée afin de pouvoir remplir au mieux les micro-textures. Ceci, ainsi que le fait que notre polymère est un élastomère thermodurcissable, pourraient expliquer les résultats obtenus ici.