



Simulation de la Réplication de Microstructures en Polymère par Moulage à Injection

par Pauline RIVIERE

**Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du
grade de Maître en maîtrise de recherche en ingénierie**

Québec, Canada

Directeur : Prof. Gelareh Momen
Co-directeur : Prof. Reza Jafari, Prof. Marie-Isabelle Farinas

RÉSUMÉ

Lors des périodes hivernales, les installations électriques sont soumises au risque de pollution, notamment à cause de la glace qui s'y dépose. Pour endiguer ce problème, de nombreux scientifiques se sont intéressés au phénomène de la superhydrophobicité. Ainsi, depuis la crise du verglas de 1998, qui a montré l'ampleur des pertes économiques et sociales d'une accumulation de glace sur les installations électriques, des solutions ont été développées : par exemple, les revêtements superhydrophobes pour les isolateurs électriques. Cependant, l'intégrité de ces solutions peut se révéler difficile à maintenir sur les isolateurs dans l'environnement ; en effet, le revêtement encourt le risque d'être enlevé de l'isolateur pour diverses raisons.

Le pavillon du givrage à l'Université du Québec à Chicoutimi, en collaboration avec l'entreprise K-Line Insulators Co., a donc envisagé une solution impliquant de créer des isolateurs superhydrophobes à l'aide du moulage à injection. Pour cela, les moules sont construits et agrémentés de microtextures au niveau de leurs parois afin de reproduire des surfaces similaires à la feuille de lotus, qui est composée de microtextures permettant à l'eau de ne pas s'accrocher à la feuille.

Le moulage à injection est une méthode simple et rapide de créer un grand nombre de produits à faible coût. Cependant, cette méthode demande de correctement paramétrer les conditions d'entrée du moulage à injection ; si ces paramètres ne sont pas correctement calibrés, le risque de défauts majeurs dans le produit final est important. Afin de vérifier l'effet de chacun de ces paramètres sur le moulage et de trouver la meilleure combinaison possible pour ces derniers, il est possible d'utiliser la simulation numérique. Simuler numériquement l'isolateur électrique permet de tester plusieurs combinaisons possibles de paramètres afin d'obtenir le produit final optimal, et ainsi d'économiser de l'argent en réduisant le nombre de prototypes nécessaires lors de la phase de test.

Afin de mettre en oeuvre ce projet, une approche numérique utilisant une simulation multi-échelle, c'est à dire une simulation dans les domaines macroscopique et microscopique, a donc été considérée. Pour cela, les logiciels Moldflow Insight Ultimate et COMSOL Multiphysics ont été utilisés. La simulation complète d'une jupe de l'isolateur a été réalisée dans Moldflow Insight Ultimate, puis un rapprochement au niveau des micro-textures a été simulé à l'aide de COMSOL Multiphysics. Une fois les simulations obtenues, une étude de la variation des différents paramètres opératoires significatifs lors du moulage à injection a été effectuée afin d'observer leur effet sur le remplissage du moule. Les résultats de ce projet ont montré qu'avec un matériel performant, il est possible de simuler numériquement le moulage à injection de surfaces micro-texturées. De plus, il semblerait que les paramètres opératoires les plus significatifs dans le moulage à injection de surfaces micro-texturées soient la température du moule, la température du polymère, la vitesse d'injection et la pression d'injection.

De nombreux défis ont été rencontrés lors de la réalisation de ce projet, notamment concernant la mise en place de la simulation multi-échelle. En effet, la possibilité de comparer

deux logiciels afin de compléter au maximum les informations obtenues sur le projet est une perspective intéressante. La continuité de ce projet pourrait donc être de réussir à lier les logiciels COMSOL Multiphysics et Moldflow Insight afin de pouvoir obtenir les informations les plus complètes possibles sur le comportement du remplissage au sein du moule micro-texturés. De plus, l'utilisation de matériaux thermodurcissables dans le moulage à injection apporte de nouvelles possibilités à la création de produits innovants, notamment dans le domaine de la superhydrophobicité.

Table des matières

RÉSUMÉ	i
Table des matières	iii
Liste des tableaux	vi
Table des figures	vii
Nomenclature	xi
REMERCIEMENTS	xiii
1 INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte du projet	1
1.1.1 Isolateurs composites	2
1.2 Problématique et objectifs de l'étude	3
1.3 Méthodologie	5
1.4 Originalité	5
2 REVUE DE LITTÉRATURE	7
2.1 Introduction	7
2.2 Mouillabilité	9
2.2.1 Définition de la mouillabilité	9
2.2.2 Régimes de mouillage	10
2.2.3 Intérêt de la superhydrophobicité	12
2.3 Techniques de protection des isolateurs composites	12
2.4 Principe du moulage à injection	14
2.4.1 Moulage à injection	14
2.4.2 Le procédé du moulage à injection	16
2.4.3 Effets des paramètres opératoires du moulage à injection	18
2.5 Matériaux	22
2.5.1 Les thermoplastiques	22
2.5.2 Les thermodurcissables	23
2.5.3 Les élastomères	23
2.5.4 Les polymères utilisés dans le moulage à injection	24
2.6 Modèles mathématiques pour le moulage à injection	27
2.6.1 Équations de dynamique des fluides et suivi du front d'écoulement . . .	27
2.6.2 Comportements visqueux du fluide et température	29
2.7 Méthodes de résolution	30

2.8	Les modèles numériques pour le moulage à injection	32
2.8.1	Simulation numérique	33
2.8.2	Les méthodes numériques	34
2.8.3	Simulation de microtextures	35
2.8.4	Validation des modèles numériques	44
3	MÉTHODOLOGIE	46
3.1	Méthodologie de résolution	46
3.1.1	Présentation des logiciels	46
3.1.1.1	Solidworks®	46
3.1.1.2	Moldflow Insight®	47
3.1.1.3	COMSOL Multiphysics®	47
3.2	Géométrie de l'étude	48
3.3	Développement du modèle principal et validation	49
3.4	Modèles mathématiques adéquats au projet	50
3.4.1	Équations de dynamique des fluides	50
3.4.2	Équations permettant le suivi du front d'écoulement	54
3.4.3	Comportements visqueux et température	56
4	RÉSULTATS OBTENUS ET ANALYSE	60
4.1	Simulations préliminaires avec Moldflow®	60
4.1.1	Résultats obtenus avec Moldflow Adviser®	60
4.1.2	Résultats obtenus avec Moldflow Insight Ultimate 2018®	64
4.1.2.1	Géométrie et maillage	64
4.1.2.2	Variation des températures du moule et du polymère	66
4.2	Validation du modèle numérique établi avec COMSOL®	71
4.2.1	Validation expérimentale	72
4.2.2	Validation numérique	79
4.2.2.1	Cas test	79
4.2.2.2	Indépendance du maillage et du pas de temps	80
4.2.2.3	Paramètres du solveur utilisé	83
4.2.2.4	Résultats du cas test	84
4.3	Résultats obtenus avec COMSOL 5.4	85
4.3.1	Écoulement isotherme au sein du moule	86
4.3.1.1	Simulations avec les paramètres proches de ceux utilisées dans l'industrie	96
4.3.1.1.1	Étude de la vitesse de l'écoulement du fluide 96	
4.3.1.1.2	Étude de la pression dans la cavité 98	
4.3.1.1.3	Évolution de la fraction volumique de fluide 99	
4.3.1.2	Variation des paramètres de la simulation	101
4.3.1.2.1	Variation des vitesses d'injection 101	
4.3.1.2.2	Modification des conditions d'entrée et de sortie 103	

4.3.1.2.3	Variation des pressions d'injection	104
4.3.2	Écoulement thermique au sein du moule	106
4.3.2.1	Simulations avec le modèle de Carreau non-newtonien	107
4.3.2.1.1	Vitesse	107
4.3.2.1.2	Fraction volumique de fluide	109
4.3.2.1.3	Température	110
4.3.2.2	Variation des températures	111
4.3.2.2.1	Variation de la température du moule	112
4.3.2.2.2	Variation de la température du polymère	113
4.3.2.3	Remplissage des micro-textures avec COMSOL	114
5	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	118
5.1	Conclusions	118
5.2	Recommandations	121
	Bibliographie	125

Liste des tableaux

2.1	Listes des matériaux thermoplastiques et des élastomères thermoplastiques trouvés dans la plupart des articles de recherche traitant du moulage à injection de polymère.	25
2.2	Listes des matériaux thermodurcissables et des élastomères trouvés dans la plupart des articles de recherche traitant du moulage à injection de polymère.	26
2.3	Équations décrivant le comportement de l'écoulement trouvées dans les articles .	28
2.4	Équations pour le comportement visqueux de l'écoulement et la température trouvées dans les articles traitant du moulage à injection de polymère.	29
2.5	Méthode de résolution et logiciels utilisés dans les différentes articles	31
4.1	Caractéristiques du maillage sélectionné pour l'isolateur avec Moldflow Insight Ultimate 2019.	65
4.2	Propriétés du matériau sélectionné pour l'analyse avec Moldflow Insight	66
4.3	Conditions initiales fournies par K-Line Insulators Co.	67
4.4	Évolution du temps de remplissage en fonction des températures du moule et du polymère	67
4.5	Évolution des pressions d'injection en fonction des températures du moule et du polymère	69
4.6	Comparaison des vitesses et pressions dans l'expérimentation et dans la simulation numérique de l'expérimentation.	77
4.7	Propriétés des différents maillages testés pour le cas test	81
4.8	Paramètres du solveur utilisé	83
4.9	Conditions initiales proches de celles utilisées dans les systèmes d'injection	87
4.10	Propriétés du LSR [78]	91
4.11	Propriétés des différents maillages testés	93
4.12	Vitesses d'injection testées	101
4.13	Conditions aux limites avec pression imposée en entrée	104
4.14	Pression d'injection testées	105
4.15	Températures de moule testées	112
4.16	Températures de moule testées	113

5.1 Paramètres sélectionnés pour les simulations COMSOL Multiphysics	124
--	-----

Table des figures

2.1 Déformation d'un fluide soumis à un effort en cisaillement τ (Source : [10])	8
2.2 Modèle de Young [92]	10
2.3 Modèles de mouillage [93]	10
2.4 Jupes auxiliaires utilisées par l'équipe du pavillon du givrage afin de protéger les isolateurs des contaminants extérieurs [17].	13
2.5 Principe du moulage à injection de polymère [94]. Schématisation du moulage à injection de polymères thermoplastiques et thermodurcissables.	17
2.6 Géométrie des plaques avec micro-piliers de la thèse de Kolev Angelov [48] avec d le diamètre du pilier et w la distance entre chaque piliers. Les piliers ont des dimensions comprises entre 25 nm et 23 μm	36
2.7 Dimension de la plaque guide de lumière de l'article de Tsai [67] et al.. La plaque guide de lumière a une longueur l de 40,0 mm et une largeur de 32,5 mm. La partie la plus épaisse de la plaque de lumière est de 3,4 mm et la partie la plus fine est à 1,0 mm.	37
2.8 Représentation en coupe du moule axisymétrique de l'article de Mael Moguedet et al. [65] Les microtextures testées dans cet article sont de dimensions com- prises entre 0,05 mm et 0,2 mm.	38
2.9 Géométrie de l'article de Choi et al. [50]. (a) : Géométrie complète de la plaque (b) : Organisation multi-échelle entre le domaine macroscopique et microscopique.	40
2.10 Géométrie choisie pour l'étude de l'écoulement dans un micro-canal par Dong- gang et al. [53]. L'épaisseur b de la géométrie est soumise à des variations entre 0,1 μm et 10 μm . La longueur l et la largeur w ne sont pas communiquées.	41
2.11 Géométrie de l'article de Grzybowski et al. [76] pour leur expérimentation sur la propagation de bulles dans des micro-canaux. Les bulles sont injectées dans le canal du milieu ayant pour diamètre $d = 0,7\mu\text{m}$	41
2.12 Outil médical en polymère de l'article de Gheorghe et al. [54]. L'outil médical a des dimensions de l'ordre du millimètre.	42
2.13 Géométrie de la micropompe en forme d'étoile [46]. La plaque circulaire de base a 3 mm de d'épaisseur et 10 mm de rayon. Les micro-canaux rectangulaires situés au niveau de la base circulaire sont longs de 37 mm et ont une largeur de 400 μm	43
2.14 Représentation schématique de la géométrie 3D utilisée par Kolev Angelov [48] pour ses simulations. Celle-ci consiste en six canaux de longueur (l) et de largeur (w) variables, mais de hauteur ($h = 30 \mu\text{m}$) similaire. Pour chaque canaux, les dimensions en micromètres (w, l) sont comme suit : (1)-(10,50), (2)-(30,150), (3)- (50, 250), (4)-(100, 500), (5)-(10,50), (6)-(50,500)	45

3.1	Géométrie de l'isolateur utilisée pour les simulations avec Moldflow. Cette dernière est composée d'une seule jupe de l'isolateur, de diamètre 150 mm. Le diamètre intérieur est d'environ 40 mm et la longueur de la jupe simulée est d'environ 20 mm.	48
3.2	Dimensions maximales des textures sur la surface de l'isolateur. (a) : Textures rectangulaires de 0,2 mm. (b) : Textures triangulaires de 0,2 mm.	49
3.3	Cellule de Hele-Shaw [95].	51
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.	61
4.2	Zoom sur la disposition des microtextures dans le logiciel Moldflow®	61
4.3	Différence entre l'analyse 3D et l'analyse Dual Domain dans le logiciel Moldflow.	63
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.	65
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.	68
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.	70
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.	72
4.8	Capture d'écran d'une vidéo de l'expérimentation	73
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.	74
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.	75
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.	76
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	76
4.13	Problèmes d'évacuation d'eau et d'air dans l'expérimentation effectuée.	78
4.14	Géométrie et donnée de l'article de J.F. Héty et al. [53]. Leur géométrie consiste en une simple cavité de moule rectangulaire simulée en deux dimensions.	79
4.15	Conditions aux limites du cas test présentées sur un schéma de ce dernier.	80
4.16	Point de coupe pour le cas test.	81
4.17	Comparaison des vitesses obtenues avec chaque maillage dans COMSOL 5.4®. Les vitesses obtenues ont été testées pour les maillages Fin, Normal, Grossier et Très Grossier sur COMSOL Multiphysics 5.4®	82
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.	83

4.19	Comparaison des courbes de vitesse obtenues entre COMSOL et l'article de J.F. Hétu et al. □ : Résultats de vitesse obtenus à l'issue de notre simulation. ◇ : Données de vitesses fournies dans l'article.	84
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].	85
4.21	Géométrie avec microtextures sur COMSOL 5.4 [®] . (a) : Géométrie sur COMSOL 5.4 [®] . (b) : Aspect des microtextures de 0,2 mm	86
4.22	Conditions appliquées aux frontières de la partie de l'isolateur simulée avec COMSOL Multiphysics 5.4 [®]	87
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.	92
4.24	Comparaison des vitesses obtenues avec chaque maillage dans COMSOL 5.4 [®] au point de coupe présenté en figure 4.23b.	93
4.25	Maillage fin raffiné aux parois de notre géométrie.	94
4.26	Comparaison des vitesses obtenues avec chaque pas de temps dans COMSOL 5.4 [®] . Les pas de temps testés sont les pas de temps 0,001 s, 0,01 s et 0,1 s.	95
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	97
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 0,5 s	98
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	99
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	100
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.	101
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.	102
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.	103
4.34	Comparaison des fractions volumique de LSR en fonction du temps de remplissage [®]	105
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	108
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.	109
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.	110
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	111

4.39 Comparaison des fractions volumique de LSR en fonction des températures du moule	113
4.40 Comparaison des fractions volumique de LSR en fonction des températures du polymère	114
4.41 Remplissage des textures dans la simulation COMSOL Multiphysics en fonction des températures de moule et de polymère.	115

Nomenclature

$\dot{\gamma}$	Taux de cisaillement
ϵ	Paramètre de contrôle de l'épaisseur de la surface
$\frac{dv}{dy}$	Taux de déformation du fluide
γ	Paramètre de réinitialisation
μ	Viscosité dynamique ($Pa.s$)
μ_0	Constante de viscosité aux taux de cisaillement nuls ($Pa.s$)
Φ	Fonction caractéristique du polymère
ρ	Masse volumique ($kg.m^{-3}$)
σ	Tension de surface ($N.m^{-1}$)
τ	Tenseur des contraintes de cisaillement (Pa)
τ^*	Taux de cisaillement critique
θ	Angle de contact ($^\circ$)
θ^*	Angle de contact apparent($^\circ$)
A_p	Aire projetée de la surface (m^2)
A_r	Aire réelle de la surface (m^2)
B	Constante
C_p	Capacité thermique massique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
D_1, A_1, A_2	Paramètres propres au fluide obtenus expérimentalement
F	Fonction de pseudo-concentration
h	hauteur (m)
Id	Matrice identité
K_{dv}	Viscosité ($Pa.s$)
k_{iso}	Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
l	longueur (m)
l_c	Longueur caractéristique (m)
n	indice de loi de puissance

Re	Nombre de Reynolds
T	Température (K)
t	Temps (s)
T^*	Température de transition vitreuse (K)
u	Vitesse du fluide ($m.s^{-1}$)
V	Volume (m^{-3})
w	largeur (m)

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu dans la concrétisation de ce projet et la rédaction de ce mémoire.

Je souhaiterais avant tout remercier mes directeurs et co-directeurs de recherche pour leur patience et leur soutien dans la mise en oeuvre de ce projet.

Je voudrais adresser à ma directrice de recherche, Professeure Gelareh Momen, toute ma gratitude et mes remerciements pour sa guidance au cours de ces années ainsi que sa compréhension.

Je tiens tout particulièrement à transmettre toute ma reconnaissance et remercier Professeure Marie Isabelle Farinas pour les précieux conseils et l'enseignement qu'elle m'a prodigué ainsi que pour tout le temps qu'elle a pu accorder tout au long de cette maîtrise.

Je souhaite remercier Professeur Reza Jafari, pour sa présence, ses questions et remarques pertinentes qui m'ont grandement aidé dans la concrétisation de ce projet.

Je remercie Khosrow Maghsoudi pour sa gentillesse, et ses précieux apprentissages sur les matériaux rencontrés dans de ce projet, ainsi que Amir Azhimi Yanchesme pour son aide dans l'utilisation des logiciels pour ce projet.

Mais je voudrais avant tout remercier ma mère, Florence, mon père, Christian, et ma soeur, Cécile, ainsi que vous mes amies précieuses, Blandine et Marie. Ces années ont été difficiles mais j'ai toujours pu compter sur votre présence et votre soutien. Vous avez supporté mes sautes d'humeur et m'avez aidé à tenir aux moments les plus éprouvants, et pour cela je vous en serai éternellement reconnaissante. Ce travail a pu aboutir car vous avez su me relever lorsque j'avais besoin d'aide, et même si c'est peu de choses, ce travail est au fond autant le vôtre que le mien.

Je dédie également ce mémoire à ma grand-mère, Rita, à mon oncle, Yves, à Ébène, à Jean-Pierre. Je vous souhaite tout le meilleur.

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte du projet

Au Canada, et dans les pays connaissant des températures hivernales très basses, les entreprises qui produisent de l'électricité rencontrent des problèmes liés à l'accumulation de glace sur les réseaux de transports électriques, notamment les isolateurs électriques, entraînant une dégradation des propriétés électriques de l'isolation électriques des lignes et favorisant l'apparition d'arc de contournement. La crise du verglas de 1998 [1, 2] en est l'exemple le plus flagrant. Elle illustre ce phénomène et incite à trouver des solutions pour limiter les dommages causés par la glace sur les lignes et les équipements électriques. Ainsi, comment régler ce problème ? Malgré l'existence de certaines techniques de dégivrage, ces dernières n'agissent qu'à partir du moment où la glace s'est accumulée sur les équipements, ce qui représente un facteur aggravant dans le processus de dégradation.

1.1.1 Isolateurs composites

Ce projet se concentre majoritairement sur les isolateurs développés par l'entreprise K-Line Insulators Co. Cette entreprise canadienne est présente sur la scène internationale en tant que manufacturier d'isolateurs électriques en élastomères de silicone de haute précision et de haute performance. Basée à Toronto, dans la province de l'Ontario, leur expertise dans le domaine des isolateurs électriques en caoutchouc de silicone est reconnue mondialement [3].

Lorsque nous cherchons à définir un isolateur composite, ce dernier est présenté comme un support en matière non conductrice d'électricité destiné à soutenir un conducteur électrique. Il a pour rôle d'assurer l'isolement électrique entre les différentes parties des installations aériennes [4].

Les isolateurs électriques représentent un faible pourcentage dans le coût total des installations aériennes, pour autant, ils n'en sont pas moins importants et les dégradations qu'ils subissent peuvent entraîner de lourdes conséquences sur les installations électriques, notamment la création d'arcs de contournement qui peuvent entraîner des pannes partielles ou totales et ainsi interrompre la distribution de l'électricité [5].

Les arcs de contournement sont un problème récurrent sur les isolateurs électriques couverts par la glace ou la pollution. Ils peuvent entraîner de sérieuses difficultés dans la distribution de l'électricité et dans la conservation de l'intégrité des lignes électriques. Les arcs de contournements sont des courts-circuits entre les parties hautes tensions et la mise à la terre. Ils sont en général provoqués par un arc électrique créé au niveau de la couche de glace qui recouvre l'isolateur électrique [5].

Pour tenter de réduire les dégâts subis par ces équipements, des scientifiques ont essayé d'agir en premier lieu sur l'accumulation de la glace en empêchant celle-ci d'adhérer à

l'isolateur électrique.

Les chercheurs au pavillon de recherche sur le givrage ont déjà reproduit avec succès des revêtements superhydrophobes et glaciophobes [6] en s'inspirant de la feuille de lotus, qui possède des propriétés non mouillantes intéressantes. Cette dernière est constituée de microtextures sur sa surface qui empêche l'eau de s'accrocher sur les feuilles, et par conséquent empêche le mouillage de la feuille. Cependant, ces revêtements présentent un inconvénient sur le long terme : le fait qu'ils soient ajoutés sur le matériau ne leur permet pas d'assurer une bonne durabilité de celui-ci. En effet, si le matériau subit des dégradations quelconques qui endommagent sa couche superficielle, il est possible que le revêtement ne résiste pas et que son effet superhydrophobe et/ou glaciophobe disparaisse. Pour remédier à ce problème, une autre façon de créer un matériau superhydrophobe/glaciophobe a été imaginée par les scientifiques. Afin d'imiter les propriétés non-mouillantes de la feuille de lotus, le pavillon de recherche sur le givrage s'est intéressé à une méthode innovante pour reproduire des surfaces microscopiques et microtexturées et résoudre le problème de durabilité rencontré avec les revêtements superhydrophobes/glaciophobes : le moulage à injection.

1.2 Problématique et objectifs de l'étude

Dans ce contexte d'exposition aux conséquences des phénomènes liées au grand froid, il est donc important que les entreprises soient en mesure de fabriquer des isolateurs superhydrophobes grâce au moulage à injection. Le moulage à injection, bien qu'étant une technique puissante permettant de produire un grand nombre de pièce rapidement et à moindre coût, peut cependant présenter quelques risques économiques. En effet, les prototypes moulés peuvent subir des dommages pendant le moulage, comme des problèmes de remplissage

effectif du moule, ou pendant le démoulage, comme des bris. Il serait donc avantageux que les entreprises travaillant sur les isolateurs superhydrophobes parviennent à prédire les réussites ou les échecs de moulage à injection.

Incontestablement, de nombreux obstacles se posent encore lors du moulage à injection, comme le remplissage effectif des microtextures, le flux réel du fluide dans les cavités microscopiques, ou encore la réussite du démoulage sans bris du produit final. Ces obstacles peuvent représenter des inconvénients majeurs d'un point de vue économique : en effet, un ou des défauts sur les produits finaux obtenus à l'issue du moulage à injection peuvent représenter une perte économique pour l'entreprise qui les a moulés.

Cependant, comment permettre aux entreprises de prédire la réussite ou l'échec d'un moulage à injection, et leur permettre d'optimiser le remplissage d'un moule afin de réduire les coûts de production ? En définissant les valeurs des paramètres clés du moulage à injection, les résultats obtenus grâce à la simulation numérique permettrait d'observer le comportement du fluide lors du moulage à injection et d'observer l'effet des différents paramètres sur son écoulement. Cela peut amener à l'utilisation d'un nombre moins important de prototype lors de la phase de test.

L'objectif principal de ce projet est donc de mettre en place une simulation numérique du moulage à injection d'un isolateur électrique composé de micro-textures afin de comprendre le phénomène du remplissage de ce dernier.

Afin de mener à bien cet objectif, il sera important de réussir à :

- Déterminer les équations régissant le comportement du fluide lors du moulage à injection de surfaces micro-texturées.
- Développer une simulation numérique pour le moulage à injection de surfaces micro-texturées.

- Tenter de prédire le comportement réel du fluide à l'aide des résultats obtenus à l'issue des simulations.
- Observer l'effet de la variation des différents paramètres clés du moulage à injection.

1.3 Méthodologie

Afin de répondre à la problématique précédente et d'atteindre les objectifs de ce projet, une méthodologie de recherche a été mise en place en s'appuyant sur les différents articles de recherche consultés dans le cadre de ce travail.

En effet, après lecture des différents articles, il a été possible de déterminer les équations les plus adaptées à notre problème. Ces équations ont ensuite été implémentées dans plusieurs logiciels sélectionnés après avoir étudié les plus utilisés dans la littérature, à savoir les logiciels Moldflow Insight Ultimate et COMSOL Multiphysics. Puis des simulations ont été réalisées tout d'abord avec le logiciel Moldflow Adviser, puis le logiciel Moldflow Insight. Ces deux logiciels ont permis d'obtenir des informations intéressantes quant au comportement du polymère lors du moulage, cependant, il n'a pas été possible d'effectuer des simulations avec des textures de hauteur inférieures à 0,5 mm, ce qui n'a pas été satisfaisant dans le cadre de ce projet.

Afin de contourner ce problème, des simulations ont été réalisées avec le logiciel COMSOL Multiphysics, qui permet plus de liberté dans la modifications des paramètres de simulation, ainsi que de travailler plus aisément qu'avec Moldflow dans le domaine microscopique.

1.4 Originalité

L'observation du contexte nous permet de dire que notre projet s'inscrit dans une problématique d'actualité qui est la réussite du moulage à injection de surfaces micro-texturées afin

de créer des équipements superhydrophobes et donc plus résistants aux chutes de neige et aux tempêtes des hivers dans les pays au climat nordique.

Conscient de cette problématique actuelle, K-Line Insulators Co. a innové en privilégiant, dans le moulage à injection d'isolateurs superhydrophobes, l'utilisation d'un caoutchouc synthétique, l'élastomère de silicone vulcanisé à haute température (HTV silicone rubber).

L'utilisation d'élastomères thermodurcissables est encore peu exploitée dans le moulage à injection, à cause de la complexité de leur moulage. Celui-ci implique l'apparition du phénomène de réticulation, qui provoque la création de liaisons chimiques au sein du matériau et rend son moulage délicat à effectuer. Réaliser un prototype avec un matériau thermodurcissable implique que celui-ci soit moulé sans défaut dès la première tentative, car tenter de le mouler à nouveau provoquerait la dégradation du prototype. De plus, très peu d'articles parlent de l'utilisation d'élastomères dans l'industrie pour le moulage à injection. Ces matériaux présentent cependant des caractéristiques favorables à la superhydrophobicité et en font des candidats de choix pour l'application recherchée.

D'autres part, le domaine de l'hydrophobicité associé au moulage à injection est peu traité dans les articles de littérature. Beaucoup d'articles parlent de moulage à microinjection avec des géométries entières de l'ordre du micromètre mais peu traitent de micro-textures, ou de surfaces microtexturées travaillées à des fins superhydrophobiques.

Les isolateurs superhydrophobes sont quant à eux assez répandus dans la littérature. Dans la majorité des articles parcourus leurs propriétés superhydrophobes est obtenues grâce à un revêtement. Par contre il n'est retrouvé peu voire pas d'articles traitant de moulage à injection d'isolateurs faits à partir d'élastomères de silicone. Toutes ces constatations nous confirment dans le caractère original de ce travail de recherche.

Chapitre 2

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

L'objectif de ce mémoire est d'être en mesure de démontrer que la modélisation du moulage à injection d'un isolateur électrique composé de microtextures est possible, ainsi que d'observer l'effet des différents paramètres clés du moulage à injection. Le défi de ce projet réside donc dans la modélisation correcte du remplissage des microstructures présentes à la surface de l'isolateur. Ce projet fait donc appel à plusieurs phénomènes physiques :

- La mécanique des fluides non-newtoniens, compressibles et visqueux ;
- Les transferts de chaleur ;
- La microfluidique, qui est la science associée à des systèmes dans lesquels de faibles volumes de fluide sont manipulés [7, 8] ;
- La rhéologie des matériaux.

Pour mener à bien cette recherche il est donc important de statuer et d'expliquer les termes importants de ce projet : le concept de fluide, de micro-injection, et d'autres encore.

- Un fluide est défini comme une collection de molécules qui, soumise à un effort en

cisaillement (voir figure 2.1), se déforme de façon continue et permanente [9]. Ainsi, lorsqu'un fluide est placé entre deux plaques dont l'une est en mouvement et l'autre immobile, et à supposer qu'il n'existe pas de glissement entre les plaques et le fluide, on observe une déformation de ce dernier et l'apparition d'un angle de déformation proportionnel à la force faisant naître l'effort en cisaillement [10].

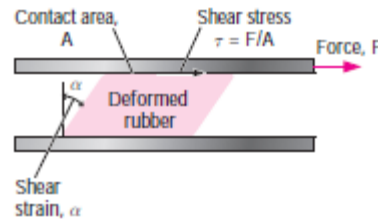


FIGURE 2.1 – Déformation d'un fluide soumis à un effort en cisaillement τ (Source : [10])

- Il est important de bien faire la différence entre deux types de moulage à micro injection dans la littérature :
 - Le moulage à micro injection qui traite des objets ayant une masse/poids inférieur au milligramme (de l'ordre du micro-gramme) ;
 - Le moulage à micro injection qui traite des objets ayant une taille de l'ordre du micromètre (on dit en général que les objets sont de l'ordre du micromètre lorsque leur taille est inférieure à $200\mu m$).

Dans cet exposé, nous considérons un isolateur composé de micro-textures à sa surface. Ces microtextures peuvent être de formes variées mais il est important qu'elles soient d'une taille permettant la superhydrophobicité de sa surface. Ainsi, nous privilégierons de traiter de cette deuxième catégorie.

- Modélisation : La modélisation est le fait de transcrire un phénomène physique à l'aide d'équations mathématiques ;
- Simulation : La simulation numérique est un outil compétitif permettant d'observer le comportement d'un phénomène physique sur ordinateur.

Cette partie traitera donc du principe du moulage à injection selon différents articles de la littérature ainsi que des différentes techniques de fabrication des moules, pour ensuite parler des différents matériaux utilisés dans le moulage à injection. Les modèles mathématiques nécessaires à ce projet seront ensuite décrits et enfin, les différents modèles numériques et les méthodologies déjà mises en place pour simuler numériquement le moulage à injection seront abordées.

2.2 Mouillabilité

2.2.1 Définition de la mouillabilité

La mouillabilité d'une surface est déterminée par la valeur de l'angle de contact, communément appelé θ , entre ladite surface et un liquide donné. La valeur de cet angle de contact va déterminer les propriétés de mouillabilité de la surface. Ces propriétés sont l'hydrophilie et l'hydrophobie de la surface ; en effet, si l'angle de contact est inférieur à 90° , la surface est définie comme hydrophile. Si l'angle de contact est supérieur à 90° , la surface est définie comme hydrophobe [11, 12]. À ces définitions, s'ajoutent les concepts de superhydrophilie et superhydrophobie. En effet, un angle proche de 0° et inférieur à 10° sera considéré comme superhydrophile et un angle supérieur à 150° sera considéré comme superhydrophobe [13].

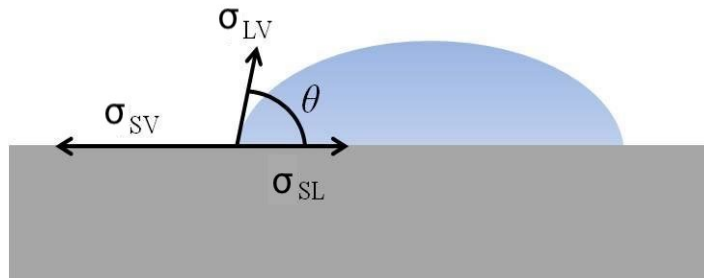
Young a établi une équation permettant de décrire cet angle de contact [14] :

$$\cos(\theta) = \frac{\sigma_{SV} - \sigma_{SL}}{\sigma_{LV}} \quad (2.1)$$

Avec :

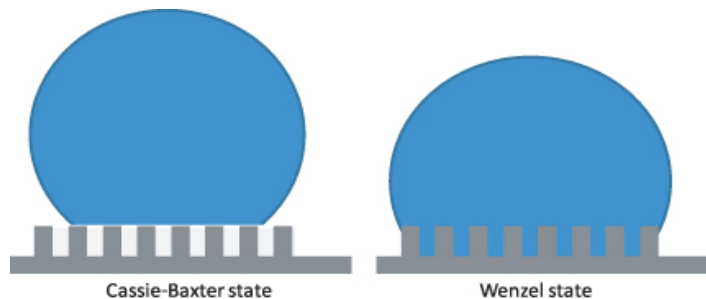
- σ_{SV} pour l'interface Solide/Vapeur
- σ_{SL} pour l'interface Solide/Liquide

- LV pour l'interface Liquide/Vapeur
- σ représente la tension de surface entre deux états

FIGURE 2.2 – *Modèle de Young [92]*

2.2.2 Régimes de mouillage

Afin de déterminer la mouillabilité d'une surface, il est important de se concentrer sur la rugosité et sur l'énergie de surface de cette dernière. En effet, ces deux propriétés permettent de déterminer si une surface est hydrophile ou hydrophobe grâce à la relation liant l'angle de contact, la rugosité et l'énergie de surface. Cette relation est décrite par les modèles de Cassie-Baxter et de Wenzel [15], tous deux présentés en figure 2.3.

FIGURE 2.3 – *Modèles de mouillage [93]*

Selon le régime de Wenzel [15], illustré dans la figure 2.3 lorsque la goutte d'eau se dépose sur une surface rugueuse, celle-ci épouse parfaitement ladite surface. Ce régime illustre donc l'effet de la rugosité de la surface lorsque la goutte pénètre au sein des rugosités du matériau.

$$\cos(\theta^*) = r \cdot \cos(\theta) \quad (2.2)$$

Avec θ l'angle de contact, θ^* l'angle de contact apparent et r l'effet de rugosité de la surface tel que :

$$r = \frac{A_r}{A_p} \quad (2.3)$$

Avec :

- A_r l'aire réelle de la surface
- A_p l'aire projetée de la surface

Il est généralement prétendu que chaque surface a une rugosité (il n'existe pas de surfaces réellement lisse), et que donc $r > 1$.

Avec ce régime, on observe donc qu'une surface hydrophile devient plus hydrophile, et une surface hydrophobe devient plus hydrophobe [14] en présence de rugosité. Lorsque la rugosité de la surface est grande, le régime tend à aller vers un mouillage nul, cependant, ceci n'a pas encore été observé dans la réalité [6].

Le modèle de Cassie-Baxter [15] lui considère que lorsque la goutte d'eau entre en contact avec la surface rugueuse, il se forme des poches d'air au niveau des micro-textures ayant pour effet de réduire le mouillage de la surface. Il est défini par l'équation suivante [12] :

$$\cos(\theta^*) = \phi_s \cos(\theta) - (1 - \phi_s) \quad (2.4)$$

Avec :

- θ l'angle de contact

— ϕ_s la fraction de la surface occupée par le liquide

2.2.3 Intérêt de la superhydrophobicité

Pour ce projet, la superhydrophobicité est d'un grand intérêt. En effet, un matériau superhydrophobe permettrait de prévenir l'adhésion de l'eau sur sa surface et préviendrait ainsi la formation de glace. Il est donc intéressant de trouver des moyens de reproduire ce phénomène à la surface des isolateurs. Comme dit précédemment, le pavillon du givrage à l'Université du Québec à Chicoutimi a déjà travaillé sur des revêtements présentant ces particularités [6]. Cependant, la durée de vie de ces revêtements est variable et ces derniers peuvent facilement être endommagés ; le moulage à injection de surfaces non-mouillantes pourrait être une alternative intéressante pour la fabrication d'un isolateur superhydrophobe.

2.3 Techniques de protection des isolateurs composites

Avant de nous concentrer sur le moulage à injection d'isolateurs superhydrophobes, il serait intéressant de consulter les différentes techniques de mitigation de la contamination des isolateurs.

La pollution étant un problème récurrent et important lors de l'utilisation d'isolateurs, les chercheurs ont travaillé à développer des techniques de mitigation de la pollution sur ces derniers. En effet, comme dit précédemment dans la partie 1.1.1, la présence de glace ou de pollution sur l'isolateur entraînent la création d'arcs de contournements qui peuvent endommager sérieusement l'intégrité des équipements électriques et la distribution d'électricité.

Dans leur article de 2006, Ramos Hernanz et al. [16] font la liste de l'ensemble des différents contaminants qui peuvent entraver le bon fonctionnement des isolateurs sur les lignes électriques, comme la cendre, le sel, la glace... etc. Selon Ramos Hernanz et al., il y

aurait trois alternatives permettant de réduire la pollution des isolateurs : premièrement, le type de matériau utilisé pour fabriquer les isolateurs, la maintenance de ces derniers et enfin l'élimination de la source de la pollution.

Masoud Farzaneh [17] et son équipe au pavillon de recherche sur le givrage ont quant à eux travaillé sur d'autres techniques permettant de réduire les effets néfastes de la pollution et de la glace sur les isolateurs. En effet, selon eux, l'utilisation de jupes auxiliaires permettrait de réduire dans un premier temps les dépôts de contaminants sur les isolateurs [18]. La figure 2.4 présente les jupes auxiliaires utilisées dans un premier temps par l'équipe de Masoud Farzaneh pour réduire l'effet de la pollution sur les isolateurs.

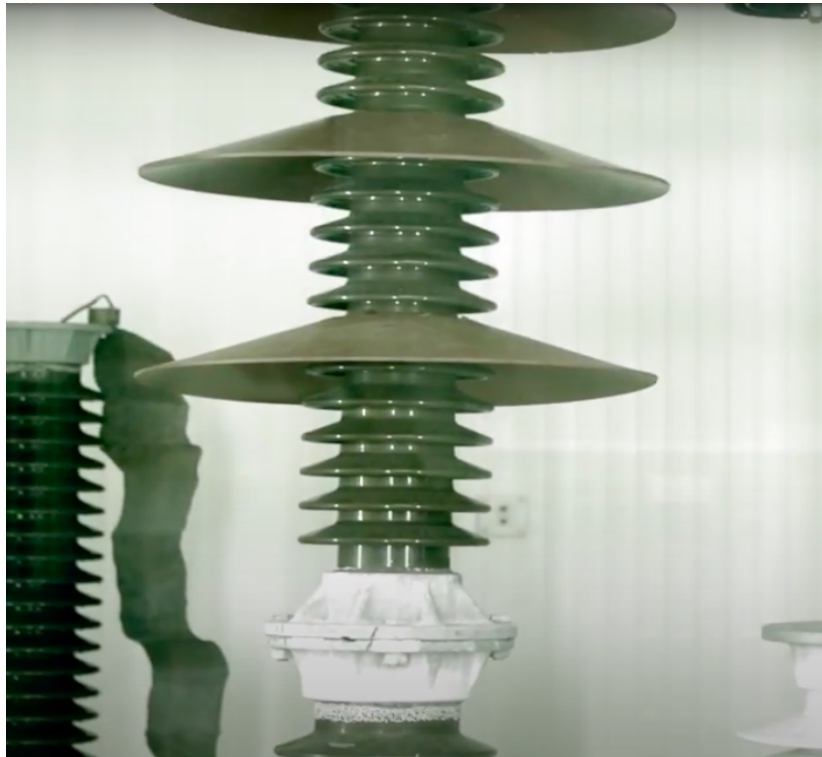


FIGURE 2.4 – Jupes auxiliaires utilisées par l'équipe du pavillon du givrage afin de protéger les isolateurs des contaminants extérieurs [17].

Afin de trouver une solution plus durable cependant, l'équipe du pavillon du givrage s'est intéressé après cela à la création de revêtements [6] superhydrophobes permettant d'empêcher l'adhésion de contaminants sur les isolateurs. Ces revêtements permettent de créer

des surfaces composées de structures micrométriques et nanométriques sur la surface de l'isolateur. Ces revêtements permettent aux gouttes d'eau notamment de rebondir sur la surface de l'isolateur, et empêche ainsi l'accrétion d'eau et de glace sur ce dernier. Cependant, comme dit précédemment, cette technique de dépôt d'un revêtement sur la surface de l'isolateur présente des inconvénients : en effet, si le moindre dommage structurel est appliqué sur le revêtement, celui-ci encourt le risque d'être enlevé de la surface et ses effets protecteurs sont nullifiés. C'est pour cette raison que le pavillon du givrage s'est intéressé à la technique du moulage à injection de polymère. En effet, la perspective de créer une surface plus durable pour les isolateurs superhydrophobes est intéressante et a été grandement recherchée.

2.4 Principe du moulage à injection

2.4.1 Moulage à injection

Le moulage à injection est une méthode de fabrication qui consiste à ramollir un matériau, en règle générale un plastique ou un polymère, et à l'injecter dans un moule pour créer la pièce voulue. C'est un procédé qui permet la production de pièces de précision en grande série, et qui a l'avantage d'être relativement peu coûteux [19]. Depuis quelques années, de nombreux scientifiques s'intéressent au moulage à injection, car il permettrait de fabriquer des pièces à l'échelle microscopique et peut être même nanoscopique. Le pavillon du givrage, en partenariat avec l'entreprise K-Line Insulators Co., s'est donc lancé dans un projet de moulage à injection d'isolateurs électriques avec une surface micro-texturée afin de rendre ces isolateurs superhydrophobes. Ce laboratoire travaille déjà sur la partie expérimentale de la conception de ces surfaces, notamment grâce au développement de revê-

tements superhydrophobes et glaciophobes et de surfaces auto-réparantes [6]. Cependant, des problèmes se posent encore pour le succès du moulage de surfaces micro-texturées, notamment à cause des rapports de forme de ces dernières. Le rapport de forme représente la relation entre deux dimensions significatives d'une surface. En général, plus ce rapport de forme est important, plus la superhydrophobicité de la surface est grande [20], ce qui est un fait intéressant pour la conception et la fabrication d'isolateurs superhydrophobes. Cependant, de grands rapports de forme rendent également plus complexe le remplissage des micro-textures composant la surface. Dans ces cas-là, il est donc souvent nécessaire de faire plusieurs tests qui risquent d'être infructueux et de devenir coûteux sur le long terme. La simulation numérique pourrait pallier à cet inconvénient. En effet, depuis de nombreuses années cette dernière permet d'observer le comportement d'un phénomène physique sans avoir recours de suite à un prototype physique. Il existe à ce jour un nombre conséquent de logiciels de simulation permettant de traiter le moulage à injection ; cependant, ces derniers demandent des ressources importantes qu'il est nécessaire de considérer pour un travail dans le domaine microscopique. De plus, les équations régissant le comportement des fluides dans le domaine microscopique seraient différentes de celles dans le domaine macroscopique. En effet, dans le domaine microscopique, la microfluidique s'applique et cette dernière obéit à certaines règles qui ne s'appliquent plus lorsque les dimensions sont plus grandes que quelques centaines de micromètres, comme par exemple le régime de l'écoulement qui est toujours laminaire pour un fluide dans le domaine microscopique [7, 21]. Par conséquent, elles demandent un travail plus poussé de la part des utilisateurs et des logiciels pour oeuvrer simultanément dans les deux domaines.

2.4.2 Le procédé du moulage à injection

Au fil des années, de nombreuses technologies ont été mises en place pour améliorer le principe de moulage à injection de polymères. Ce procédé est un processus répétitif qui se décline en plusieurs étapes : la première est d'injecter un polymère dans un moule à l'aide de canaux dans lesquels le polymère va passer pour remplir le moule. La deuxième consiste à compacter le polymère fondu en lui appliquant une forte pression afin qu'il remplisse toutes les parties du moule. Enfin vient la partie où il faut faire refroidir le moule et/ou le polymère, pour pouvoir ainsi passer à la phase de démoulage. C'est une méthode qui se répand de plus en plus car elle présente de nombreux avantages : en effet, elle est peu coûteuse et permet de produire en grande quantité des pièces de précision à l'aide d'une manipulation hautement automatisée. Mais cette opération hautement automatisée demande une préparation préalable importante et précise afin d'assurer la réussite du moulage [22].

Il existe plusieurs façons d'effectuer le moulage à injection de polymère, mais dans ce projet, nous allons uniquement nous pencher sur les deux méthodes les plus répandues et utiles pour notre problème, que l'on peut voir schématisée dans la figure 2.5. En effet, l'utilisation de différents types de polymères implique de faire des modifications dans le processus de moulage à injection. Les différences entre ces différents polymères seront expliquées dans la partie 2.5.

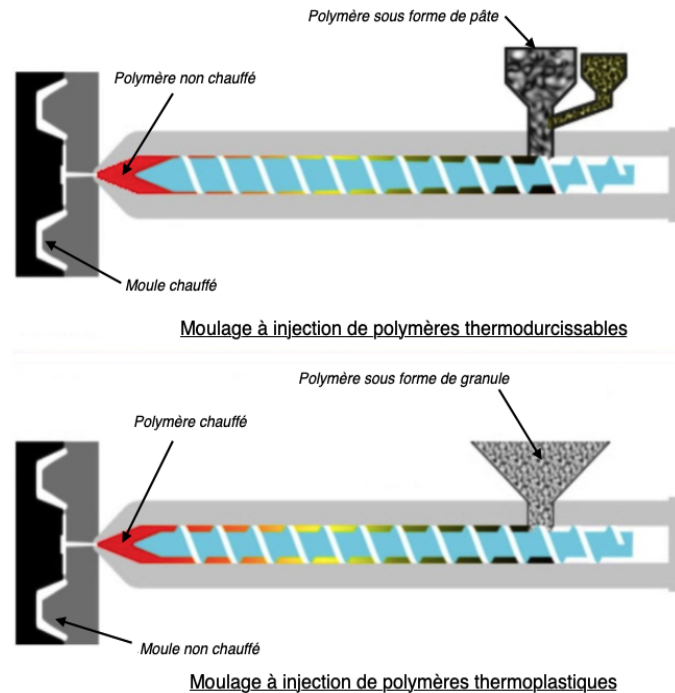


FIGURE 2.5 – Principe du moulage à injection de polymère [94]. Schématisation du moulage à injection de polymères thermoplastiques et thermodurcissables.

La première méthode consiste à chauffer le moule et non pas le polymère que l'on veut modeler. Cette méthode est majoritairement utilisée pour les matériaux thermodurcissables, car ces derniers ne supportent pas les cycles de chauffage et refroidissement comme les matériaux thermoplastiques [22]. Au vu du matériau sélectionné par l'entreprise K-Line Insulators Co., cette méthode est celle qui nous intéresse.

La deuxième méthode de moulage à injection est utilisée pour les matériaux thermoplastiques et est la plus répandue dans la littérature. Elle consiste à faire fondre le polymère et à l'injecter avec une pression dans un moule non chauffé, puis de faire refroidir le polymère grâce à des conduites de refroidissement placées à certains endroits stratégiques. Cette méthode est majoritairement utilisée pour les matériaux thermoplastiques car ces derniers ont la capacité de subir plusieurs cycles de chauffage et refroidissement sans affecter leurs propriétés [22].

2.4.3 Effets des paramètres opératoires du moulage à injection

La réussite du moulage à injection et de la réplique de micro-textures dépend fortement de différents paramètres plus ou moins aisés à contrôler. En effet, plusieurs articles s'accordent pour dire que les températures du moule et du polymère, ainsi que la pression de maintien et la vitesse d'injection sont des paramètres clés dans le succès du moulage et de la réplique[20, 23, 24, 25].

2.2.2.1. Températures

Les températures du moule et du polymère sont des paramètres importants dans la réussite du moulage à injection.

En effet, selon Matschuk et al. [26] ainsi que Whiteside et al. [27, 28], lorsque la température du moule est inférieure à la température de transition vitreuse du polymère, on observe un remplissage moins bon des micro-structures. La température de transition vitreuse T_g est la température de transition entre la forme dure du polymère et sa forme élastomérique [29]. Les élastomères ont la particularité d'avoir une température de transition vitreuse extrêmement basse, ce qui les rend très intéressants pour le moulage à injection [30]. En effet, lors du moulage à injection, si la température du moule n'est pas calibrée correctement, il est possible d'observer la formation d'une couche solide au niveau des parois du moule, empêchant le polymère d'entrer dans les microtextures. Plusieurs articles s'accordent à dire que pour prévenir la formation de cette couche, il est conseillé de choisir une température du moule au moins 30 à 40°C supérieure à la température de transition vitreuse du polymère moulé [31, 32]. Il semble donc que plus la température du moule est importante, plus le remplissage du moule ainsi que des micro-structures est réussi. Cependant, Liou et al. [33] ont constaté dans leurs travaux qu'une trop grande augmentation de la température du moule

pouvait entraîner la formation de poches de gaz pendant le remplissage, endommageant ainsi le produit issu de ce moulage.

De plus, une température du moule importante augmente la durée des cycles de chauffage et de refroidissement nécessaire à la production des produits moulés [20]. Une durée de cycle plus longue implique que moins de produits seront fabriqués lors d'un temps donné, ce qui peut être une problématique importante dans l'industrie. Pour pallier à ce problème, un système de régulation variotherme a été pensé par des scientifiques : ce système implique d'avoir un moule chaud pendant le remplissage, puis froid pendant le refroidissement du polymère avant le démoulage. Cependant, même si ce système reste intéressant dans la réduction du temps de cycle pour une température de moule importante, le passage rapide de chaud à froid décroît la durée de vie du moule et demande un équipement plus coûteux [20].

En ce qui concerne la température du polymère, l'effet de celle-ci est, selon plusieurs articles, assez similaire à l'effet de la température du moule [34, 35]. En effet, lorsque la température du polymère augmente, sa viscosité diminue, ce qui permet un meilleur remplissage des textures [34]. Cependant, même si ceci est valable pour les matériaux thermoplastiques, il est important de garder à l'esprit que nous travaillons avec un élastomère thermodurcissable. Ces matériaux subissent ce que l'on appelle la réticulation, qui est un processus permettant de créer des liaisons chimiques entre des molécules, expliqué plus en détails dans la partie 2.5. Ce phénomène est à éviter ou à retarder le plus possible lorsque l'on souhaite mouler un matériau aux propriétés thermodurcissables, car une fois celui-ci lancé, il se forme une couche solide qui peut empêcher le remplissage des micro-textures. Dans notre cas, il est donc important de garder la température du polymère la plus basse possible afin d'éviter d'accélérer la réticulation du polymère [20]. Selon Hopmann et al. [36], qui ont utilisé

un composé thermodurci X22 produit par la compagnie Hexion Specialty Chemicals GmbH, Iserlohn- Letmathe, NRW, Germany, la meilleure condition pour le moulage à injection serait d'avoir une haute température de moule et une basse température de polymère.

Les températures les plus couramment utilisées dans l'industrie pour les moules sont de l'ordre de 100 à 200 °C en fonction du type de polymère sélectionné. En ce qui concerne la température du polymère, celle-ci sera plutôt basse (de l'ordre de la température ambiante par exemple) si nous souhaitons mouler un polymère thermodurcissable, et plutôt élevée (de l'ordre de 100 °C si nous moulons un polymère thermoplastique).

2.2.2.2. Vitesse d'injection

Selon plusieurs articles, la vitesse d'injection permet d'assurer un meilleur remplissage de la géométrie et des microstructures pendant le remplissage du moule. En effet, une vitesse d'injection importante permet tout d'abord de réduire la viscosité du polymère, mais aussi de réduire le temps de remplissage et donc le taux de refroidissement du polymère pendant le temps de remplissage [20, 37, 38, 39, 40].

Dans le cas de notre élastomère thermodurcissable, il est important de réduire le temps de contact entre ce dernier et le moule afin d'éviter le phénomène de réticulation [20]. En effet, si l'on parvient à réduire le temps de contact entre le moule et l'élastomère thermoplastique, on pourrait permettre au polymère de remplir correctement le moule avant que le phénomène de réticulation ne se déclenche et qu'il le fixe dans sa forme définitive. Hopmann et al. [36] concluent donc qu'il est intéressant d'avoir une grande vitesse d'injection dans le cas d'un élastomère de silicone. Cependant, plus la vitesse d'injection est importante, plus l'on peut observer l'apparition de contraintes de cisaillement au sein du matériau qui risquent de se retrouver dans le matériau une fois celui-ci moulé, et les frottements des couches de

matériau les unes avec les autres peuvent également induire un chauffage du matériau qui entraînerait une accélération de la réticulation du polymère, ce que l'on souhaite éviter à tout prix [36]. Il est donc important que la vitesse d'injection soit correctement calibrée pour un élastomère de silicone. De plus, toujours selon Hopmann et al. [36], une grande vitesse d'injection permet certes une plus grande uniformité dans le remplissage du moule, mais ils ont pu constater que cela n'affectait pas particulièrement la qualité du remplissage des microtextures pour des polymères thermodurcissables [20, 36].

2.2.2.3. Pressions

En ce qui concerne les pressions au sein du moule lors du moulage à injection, on peut distinguer :

- La pression d'injection ;
- La pression de compactage.

La pression d'injection a un effet sur la fluidité du polymère et sur la qualité de la réplification, cependant ses effets semblent avoir été moins étudiés que les effets de la pression de compactage. En effet, selon Matschuck et al. [26] et Liou et al. [33] la majeure partie du remplissage des micro-structures lors du moulage à micro-injection se fait lors de la phase de compactage, qui a lieu lorsque la phase de remplissage du moule est terminée. Ainsi, plus la pression de compactage est importante, plus le remplissage des textures sera efficace[20]. Selon Lucchetta et al. [41], la vitesse d'injection et la pression de compactage sont intrinsèquement liés. En effet, une vitesse d'injection très importante entraînera une distribution peu uniforme de la pression de compactage, ce qui peut provoquer un mauvais remplissage des micro-textures. Afin d'obtenir une bonne réplification des textures, les meilleurs paramètres seraient donc, selon eux, d'avoir une faible vitesse d'injection et une forte pression d'injec-

tion pour un polymère thermoplastique.

Dans l'industrie, les pressions les plus communément utilisées sont de l'ordre de 100 bar. En effet, le moulage à injection de polymère demande l'utilisation de grandes pressions afin d'assurer le remplissage complet et sans défaut du moule.

Il existe bien sûr de nombreux autres paramètres ayant plus ou moins d'effets sur la qualité de la réplication, notamment l'évacuation d'air, la distance de remplissage...etc. Mais les paramètres de traitement les plus importants pour le moulage à injection semblent être la vitesse d'injection, les différentes pressions au sein du moule et les températures du moule et du polymère [20].

2.5 Matériaux

Les matériaux les plus couramment utilisés dans le moulage à injection sont les polymères. Un polymère est une macromolécule composée de plusieurs sous-entités qui sont la répétition d'atomes ou de groupes d'atomes. Pour notre étude, il est intéressant de se concentrer sur trois classes de polymères dans lesquelles la plupart d'entre eux se trouvent : les polymères thermoplastiques, les polymères croisés, appelés thermodurcissables, et les élastomères [22].

2.5.1 Les thermoplastiques

Les thermoplastiques sont une vaste classe de polymères permettant un grand nombre d'utilisation, car il en existe une grande quantité et leurs applications sont variées [42]. Ces derniers peuvent subir de nombreux cycles de chauffage et de refroidissement sans que leurs propriétés ne soient affectées. En règle générale, les thermoplastiques sont fournis sous forme de granules, qui sont ensuite ramollies par la chaleur et la pression, permettant

leur formage. Lors du refroidissement, ces dernières se solidifient et prennent la forme désirée sans qu'il n'y ait de transformations chimiques pendant le processus [22]. En général, les procédés utilisés pour mouler des thermoplastiques sont le moulage à injection, l'estampage à chaud, le moulage par injection-compression et le thermoformage [42].

2.5.2 Les thermodurcissables

Les matériaux thermodurcissables eux ont comme particularité qu'à l'issue de leur dernier chauffage, ils deviennent ensuite insolubles et infusibles de façon permanente. Cela est dû au fait qu'ils subissent une réticulation lors de ce chauffage : en effet, les molécules qui les constituent passent d'un état indépendant à un état où elles sont liées entre elles par des liaisons chimiques. Il est donc important de réussir le formage des matériaux thermodurcissables, car un chauffage supplémentaire dégradera les liaisons chimiques créées précédemment et endommagera le matériau. Les matériaux thermodurcissables sont souvent fournis sous forme de pâte et peuvent être modelés avec ou sans pression pour obtenir la forme désirée [22, 43]. Pour mouler les matériaux thermodurcissables, le principe de moulage par injection-réaction est majoritairement utilisé [42].

2.5.3 Les élastomères

Les élastomères sont des matériaux ayant de grandes propriétés élastiques et extensibles. Ces matériaux peuvent être soit naturels, et donc provenir d'un caoutchouc naturel issu de plantes telles que l'hévéa, soit synthétiques, qui sont le plus souvent utilisés dans l'industrie. Les élastomères synthétiques sont souvent travaillés à partir d'un caoutchouc naturel que l'on aura vulcanisé. Ce procédé de vulcanisation consiste à ajouter un produit chimique, comme par exemple du soufre, afin d'améliorer la résistance de l'élastomère, au détriment

cependant de son élasticité [44].

2.5.4 Les polymères utilisés dans le moulage à injection

La littérature sur le moulage à injection de polymère traite majoritairement du moulage à injection des matériaux thermoplastiques, et il est peu commun de voir une étude de moulage à injection de matériaux thermodurcissables ou d'élastomères. Dans notre étude de la bibliographie liée à notre projet, voici les différents polymères rencontrés dans les différents articles :

La table 2.1 présente donc les différents matériaux rencontrés lors de la recherche bibliographique effectuée pour ce projet, qui sont assez nombreux et variés. De plus, les utilisations de ces différents matériaux sont également diverses : il n'est pas rare d'en rencontrer dans le domaine médical.

TABLE 2.1 – *Listes des matériaux thermoplastiques et des élastomères thermoplastiques trouvés dans la plupart des articles de recherche traitant du moulage à injection de polymère.*

Thermoplastiques et élastomères thermoplastiques utilisés dans les articles	Références
Polycarbonate (PC)	Abbasi et al.[45], Hill et al.[46], Kim[47], Kolev Angelov[48], La et al.[49]
Polypropylène (PP)	Abbasi et al.[45], Choi et al.[50], Gheisari et al.[51], Griffiths et al.[52], Liou et al.[33]
Polystyrène (PS)	Donggang et al.[53]
Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS)	Gheisari et al.[51], Griffiths et al.[52]
Poly(lactic acid) resins biopolymer (PLA)	Gheorghe et al.[54]
Poly(oxyméthylène)	Hill et al.[46]
Poly(méthyl méthacrylate) (PMMA)	Jiang et al.[55], Kolev Angelov[48], Lin et al.[34], Liou et al.[33]
Styrene-b-ethylene-co-butylene-b-styrene (SEBS)	Juárez et al.[56]
Styrene butadiene block copolymère (SBS)	Kolev Angelov[48]
Polyimide (PI)	Kim[47]
Cyclo-olefin copolymère (COC)	Kolev Angelov[48]
High density Polyéthylène (HDPE)	Liou et al.[33]
Élastomère thermoplastique (TPE)	Baruffi et al.[57]

La table 2.2 présente les matériaux thermodurcissables et les élastomères trouvés dans les articles de la recherche bibliographique, qui sont eux moins nombreux et dont les articles

sont plus récents.

TABLE 2.2 – *Listes des matériaux thermodurcissables et des élastomères trouvés dans la plupart des articles de recherche traitant du moulage à injection de polymère.*

Thermodurcissables et élastomères utilisés dans les articles	Références
Composé phénolique de moulage thermodurci (X22)	Hopmann et al.[58]
Élastomères	Arrillaga et al.[59]
Élastomère de silicone liquide	Hopmann et al.[36]

Très peu d'articles traitent du moulage à injection de polymères thermodurcissables ou d'élastomères, comme le confirme Baruffi et al. [57] dans son article de 2018, à cause, notamment, de la nécessité de réussir le moulage dès le premier essai. Nous avons pu cependant trouver l'article récent de Hopmann et al. [58] (2017) qui traite des possibilités de diminution de poids des polymères thermodurcissables moulés. Arrillaga et al. [59] ainsi que Hopmann et al. [36] dans un article plus ancien (2014), se sont eux intéressés à des élastomères de silicone, et notamment à l'élastomère de silicone liquide pour des applications superhydrophobes générales.

L'entreprise K-Line Insulators Co. utilise un élastomère de silicone HTV (High Temperature Vulcanized) pour ses isolateurs électriques. Les élastomères de silicone sont reconnus pour leur bonne durabilité, leur résistance aux ultraviolets, mais surtout pour leurs propriétés hydrophobes, ce qui est intéressant pour ce projet [60]. Pour faciliter notre étude, nous avons décidé de simuler numériquement l'écoulement du caoutchouc de silicone liquide, le

LSR (Liquid Silicone Rubber). Ce dernier présente des propriétés très similaires à celles du silicone HTV, cependant il est moins visqueux et nous permet donc de simuler plus facilement l'écoulement au sein du moule. Pour ensuite modéliser le silicone HTV, il sera possible de se concentrer sur l'augmentation de la viscosité du matériau [60].

2.6 Modèles mathématiques pour le moulage à injection

L'ensemble des articles parcourus lors de la recherche bibliographique nous a permis de mettre en évidence les différentes équations utilisées par les chercheurs pour des problèmes de moulage à injection. Dans chacun de ces articles, des équations de dynamique des fluides ont été utilisées, ainsi que des équations de comportements visqueux et de température.

2.6.1 Équations de dynamique des fluides et suivi du front d'écoulement

En ce qui concerne les équations de dynamique des fluides et de suivi de l'écoulement, le tableau 2.3 présente les différentes équations que les chercheurs ont utilisé dans les articles parcourus :

TABLE 2.3 – Équations décrivant le comportement de l'écoulement trouvées dans les articles

Articles	Équations de dynamique des fluides	Équations de suivi du front d'écoulement
Hetu et al. (1998)[61]	Équations de Stokes	Méthode de pseudo-concentration (méthode des volumes de fluides modifiée)
Donovan (2014) [62]	Équations de Navier-Stokes	Méthode Level Set
Choi et al. (2011) [50]	Équations de Navier-Stokes	Méthode Level Set
Courbebaisse et al. (2005) [63]	Modèle de Hele Shaw	Méthode des volumes de fluide (VOF)
Donggang et al. (2002) [53]	Modèle de Hele Shaw	NA
Gheisari et al. (2016) [51]	Modèle de Hele Shaw et équations de Navier-Stokes	NA
Tom (2007) [64]	Équations de Navier Stokes	NA
Moguedet et al. (2009)[65]	Équations de Navier-Stokes	Méthode Level Set
Kolev Angelov (2007)[48]	Équations de Navier-Stokes	NA

Nous observons dans la table 2.3 que les chercheurs ont majoritairement utilisé soit le

modèle de Hele-Shaw, soit les équations de Navier Stokes pour simuler le comportement du fluide dans la cavité du moule. Le modèle de Hele-Shaw notamment est utilisé dans une grande partie des logiciels de simulation numérique tel que Moldflow, CADMould et C-Mold, qui sont les logiciels principaux sur le marché en ce qui concerne le moulage à injection de polymères.

2.6.2 Comportements visqueux du fluide et température

En ce qui concerne le comportement visqueux du fluide et la température, le tableau 2.4 présente les différentes équations utilisées par les auteurs dans les articles et thèses compilées pour ce mémoire :

TABLE 2.4 – Équations pour le comportement visqueux de l'écoulement et la température trouvées dans les articles traitant du moulage à injection de polymère.

Articles	Modèles de viscosité et température
Hetu et al. (1998)[61]	Modèle de Carreau et Arrhénius
Donovan (2014) [62]	Modèles newtoniens
Choi et al. (2011) [50]	Modèle de Cross-WLF
Courbebaisse et al. (2005) [63]	Modèle newtoniens
Donggang et al. (2002) [53]	Modèle de Cross-WLF
Gheisari et al. (2016) [51]	Modèle de Cross-WLF
Tom (2007) [64]	Modèle de Cross-WLF
Moguedet et al. (2009)[65]	Modèle de Cross-WLF, équations de convection-diffusion
Kolev Angelov (2007)[48]	Modèle de Cross-WLF

Au vu du tableau 2.4, la plupart des articles s'accordent sur l'utilisation du modèle de

Cross-WLF, qui décrit le comportement non newtonien d'un polymère thermoplastique.

2.7 Méthodes de résolution

Dans l'ensemble des articles parcourus, deux méthodes de résolution des problèmes de moulage à injection ont pu être mise en évidence :

- La méthode de résolution impliquant le développement complet d'un logiciel ou d'un code maison pour le problème ;
- La méthode impliquant l'utilisation de logiciels pré-existants.

La première méthode, qui implique le développement d'un code maison, présente en effet de nombreux avantages : le logiciel final est un logiciel spécifiquement conçu pour le problème, et les chercheurs ont une liberté totale dans les équations et les paramètres à utiliser dans le logiciel conçu. Cependant, cela demande de nombreuses ressources et représente une démarche longue et fastidieuse. Courbebaisse et al. [63], Donggang et al. [53] ainsi que Kim [47] ont opté pour cette méthode. En effet, Courbebaisse et al.[63] utilisent différents modèles pour mener à bien leur projet de recherche sur l'optimisation du moulage à injection : Tout d'abord, l'utilisation du concept de propagation des distances géodésiques leur permet d'estimer le remplissage et le comportement du polymère fondu au sein du moule. Puis une technique d'optimisation mathématique basée sur le travail de Papadimitriou et al.[66] leur permet de trouver la porte d'injection optimale pour leur géométrie. Ces algorithmes sont ensuite entrés dans un logiciel OpenGrid en langage C++ pour simuler numériquement le moulage à injection de leur géométrie.

La deuxième méthode, qui consiste à utiliser des modèles pré-existants, offre moins de liberté aux utilisateurs, et présente parfois quelques problèmes lorsque l'on veut effectuer la simulation au niveau microscopique (en effet, les comportements des fluides dans le moule

au niveau microscopique différent des comportements au niveau macroscopique, ce qui implique des modifications nécessaires dans les équations de comportements). Cependant, les chercheurs comme Choi et al. [50] ou encore Moguedet et al. [65], qui ont utilisé cette méthode de résolution, ont réussi à pallier à ce problème en couplant deux logiciels pré-existants.

La table 2.5 présente quelques articles consultés, ainsi que les méthodes et les logiciels utilisés par ces derniers :

TABLE 2.5 – Méthode de résolution et logiciels utilisés dans les différentes articles

Articles	Méthode de résolution et logiciels utilisés
Choi et al.(2011)[50]	Moldflow MPI, COMSOL 4.0
Hetu et al. (1998)[61]	COMSOL Multiphysics
Donovan (2014) [62]	COMSOL Multiphysics
Courbebaisse et al. (2005) [63]	Code maison
Donggang et al. (2002) [53]	Code maison
Gheisari et al. (2016) [51]	Moldflow, utilisation de logiciels pré-existants
Moguedet et al. (2009)[65]	Moldflow, COMSOL Multiphysics
Kolev Angelov (2007)[48]	Moldflow MPI 6.0, COMSOL Multiphysics, Code maison
Hill et al. (1970)[46]	I-DEAS Master Series
Yu(2004)[40]	C-Mold, Code Maison
Tsai et al.(2008)[67]	Moldflow
Kim(2012)[47]	Code maison
Gheorghe et al.()[54]	Moldflow Insight
La et al.(2017)[49]	Code maison

Nous observons dans la table 2.5 que les méthodes de résolution restent à la discrétion des groupes de recherche, et ces derniers utilisent la méthode leur permettant d'atteindre au mieux leurs objectifs. Pour des raisons de contrainte de temps et de compétence, il a été décidé pour ce projet que la deuxième méthode, à savoir la méthode impliquant l'utilisation de logiciels pré-existants, sera utilisée.

Pour cela, la liste des différents logiciels sélectionnés dans les articles nous est utile. En effet, deux logiciels semblent sortir du lot lors de notre étude bibliographique :

- Le logiciel Moldflow, qui est très utilisé dans les articles pour tout ce qui concerne les problèmes de moulage à injection au niveau macroscopique. Plusieurs articles ([50, 65, 48]) notent cependant les moins bonnes performances de Moldflow dans le domaine microscopique et ont donc décidé de coupler ce dernier à un autre logiciel afin de correctement modéliser le comportement du fluide au niveau microscopique.
- Pour cela, beaucoup d'articles semblent avoir choisi le logiciel COMSOL Multiphysics, qui est un logiciel d'éléments finis permettant le couplage de plusieurs physiques, mais aussi une plus grande liberté dans la personnalisation des problèmes que Moldflow.

Ces deux logiciels semblent donc être les plus intéressants pour notre projet de simulation de moulage à injection de surfaces microtexturées.

2.8 Les modèles numériques pour le moulage à injection

Avant même de considérer le moulage à injection, il est important que les entreprises puissent prévoir le comportement du polymère fondu au sein du moule afin d'éventuellement être en mesure de prévenir les défauts éventuels de la pièce et les risques de bris de cette dernière lors du démoulage. Plusieurs études se sont lancées dans le défi de si-

muler numériquement le moulage à injection d'une pièce composée de microtextures. Les motivations qui poussent à utiliser la simulation numérique sont nombreuses : en effet, la simulation permet d'obtenir une première observation du comportement du polymère dans le moule sans avoir recours à un prototype physique dans un premier temps [68].

2.8.1 Simulation numérique

La simulation numérique est le processus de représentation de phénomènes physiques à l'aide d'une série de calculs effectués sur un ordinateur. Elle permet d'observer et de décrire le résultat de ce phénomène physique, comme si celui-ci s'était réellement déroulé.

La simulation numérique repose sur la résolution d'équations aux dérivées partielles par un ordinateur, en utilisant différents types de méthode en fonction du problème simulé. La méthode la plus répandue en simulation numérique est la méthode des éléments finis, cependant il en existe d'autres encore qui sont parfois utilisées à la place de cette dernière ou en synergie avec elle.

De nombreux domaines scientifiques ont recours à la simulation numérique de nos jours. Elle permet en effet d'observer le comportement d'un phénomène physique lorsque celui-ci est soumis à des variations telles que des variations de température, de pressions... etc, avant d'avoir recours à la fabrication d'un prototype [69, 70]. Elle pourrait permettre également dans une certaine mesure de réduire les coûts d'un produit si l'on est capable grâce à elle d'obtenir un design gagnant dès le départ. Elle est en effet un atout majeur permettant de valider la viabilité d'un produit avant d'effectuer des tests physiques.

Aussi dans ce projet nous nous intéresserons à la simulation numérique afin de voir si celle-ci peut nous aider à prédire correctement la réussite du moulage à injection de surfaces microtexturées, et éventuellement afin d'observer les effets de différents paramètres sur ce

phénomène physique.

2.8.2 Les méthodes numériques

Il existe de nombreuses méthodes numériques qui peuvent être utilisées pour prévoir la réussite du moulage à injection. Trois d'entre elles sont majoritairement utilisées, pour leur robustesse et leur grande capacité à discrétiser et mailler les géométries choisies pour le moulage à injection. Nous avons notamment la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis, qui sont des méthodes basées sur le maillage des géométries. Il est également possible d'utiliser des méthodes sans maillage.

La méthode des différences finies (FDM, Finite Difference Method) est la plus simple pour étudier l'écoulement d'un fluide et un transfert de chaleur dans des géométries simples. Des auteurs comme Pearson [71] utilisent cette méthode pour étudier l'écoulement du fluide pour les problèmes numériques de moulage à injection. Cependant, à partir du moment où la géométrie choisie comporte des irrégularités ou des parties complexes, la FDM n'arrive plus à s'adapter. Cette méthode est donc correcte pour des géométries simples. La méthode des différences finies est majoritairement utilisée conjointement à d'autres méthodes numériques car elle nécessite l'appui d'autres méthodes pour être pleinement efficace et pertinente pour le problème [22].

En ce qui concerne la méthode des volumes finis (FVM, Finite Volume Method), elle s'adapte plus facilement aux géométries complexes ou irrégulières et est la plus utilisée par les logiciels de dynamique des fluides [22].

La méthode des éléments finis lui est similaire en de nombreux points. Elle est cependant la plus majoritairement utilisée dans les articles, car c'est celle qui est utilisée par les logiciels utilisés par ces derniers [22].

Les méthodes sans maillage sont des méthodes qui ne dépendent pas du maillage généré avant le calcul du logiciel. En général la fonction de forme issue de ces méthodes est bien meilleure que celle des méthodes précédentes, car elle ne dépend pas des cellules produites par le maillage, et elle est tellement lisse qu'elle n'a pas besoin d'un post-traitement. Cependant, la matrice issue de cette méthode est beaucoup plus imposante que les matrices issues des méthodes précédentes, ce qui implique donc que les temps de calcul sont considérablement rallongés [22].

Lors de la mise en place des simulations numériques dans les articles et les thèses, la méthode des différences finies est utilisée par certains scientifiques [40, 47, 49, 72], mais il semble que c'est la méthode des éléments finis qui est mentionnée et utilisée dans le plus grand nombre d'articles, parfois couplée avec la méthode des différences finies ([46, 47, 49, 52, 59, 62, 65, 72, 73, 74]...)

2.8.3 Simulation de microtextures

La littérature sur les microtextures de nos jours portent en majorité sur les applications médicales et biomédicales des microcanaux : beaucoup de dispositifs d'injection de médicaments par microcanaux ont été étudiés. Lee Jae Hwan [74] dans sa thèse travaille sur le design de micro canaux de façon à optimiser l'injection de médicaments dans les yeux. Ce qui nous intéresse plus particulièrement dans notre sujet ici sont les applications à des microtextures. Aleksandar Kolev Angelov [48] a par exemple beaucoup travaillé avec COMSOL® et Moldflow® en 2007 pour tenter de régler les problèmes de la simulation à cette époque, notamment le fait que :

- Les données rhéologiques des matériaux sont prises au niveau macroscopique.
- Les conditions de glissement au parois sont ignorés.

— Les effets de surface dus au niveau macroscopique sont ignorés... etc.

Ce dernier a travaillé sur la simulation numérique ainsi que la fabrication de moule en silicone par différents moyens. Il s'est ensuite concentré sur la simulation et fabrication de prototypes par moulage à micro-injection à partir des moules obtenus précédemment. La plupart de ses géométries sont des plaques simples où il a fait varier la taille et l'espacement des textures, comme on peut le voir sur la figure 2.6. Dans cette figure, nous observons une plaque composée de microtextures sous forme de piliers ayant des dimensions comprises dans le domaine microscopique. Ce travail est très intéressant pour notre projet, car la géométrie choisie se rapproche de la géométrie que nous souhaitons simuler, à savoir une surface d'isolateurs composées de microtextures.

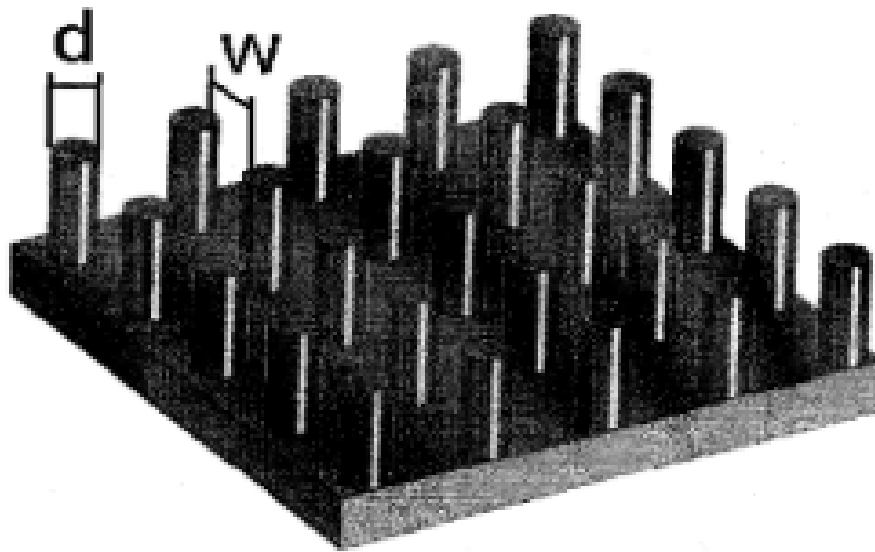


FIGURE 2.6 – Géométrie des plaques avec micro-piliers de la thèse de Kolev Angelov [48] avec d le diamètre du pilier et w la distance entre chaque piliers. Les piliers ont des dimensions comprises entre 25 nm et $23\text{ }\mu\text{m}$.

Comme dit dans l'introduction de cette partie, il est important de faire attention à ce que les auteurs d'articles veulent dire par "moulage à micro injection". En effet, l'article de Tsai et al. [67], par exemple, traite de moulage à micro injection pour des prototypes optiques

ayant des tailles de l'ordre du millimètre, mais une masse/poids de l'ordre du micromètre. La géométrie utilisée par Tsai et al. [67] est présentée en figure 2.7. On observe sur cette figure une plaque de lumière ayant des dimensions dans le millimètre. Ce travail présente des informations d'intérêt pour ce projet, notamment concernant le processus choisi pour simuler la plaque optique par ordinateur, cependant, la géométrie choisie est assez éloignée de celle simulée ici. Il est néanmoins intéressant de récupérer les informations générales sur la micro-injection obtenues dans cet article.

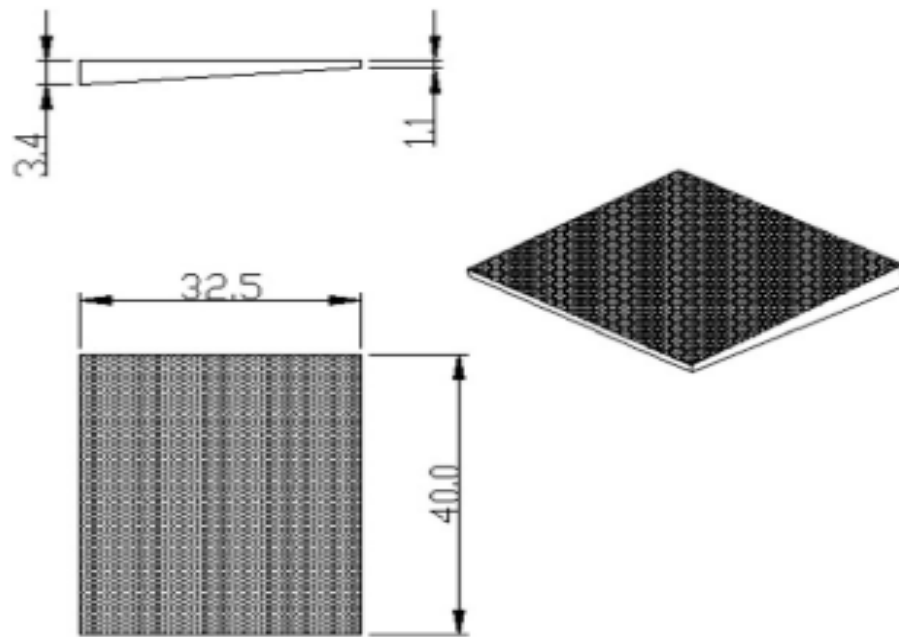


FIGURE 2.7 – Dimension de la plaque guide de lumière de l'article de Tsai [67] et al.. La plaque guide de lumière a une longueur l de 40,0 mm et une largeur de 32,5 mm. La partie la plus épaisse de la plaque de lumière est de 3,4 mm et la partie la plus fine est à 1,0 mm.

Comme nous pouvons le voir donc avec l'article de Tsai et al. [67], le moulage à micro-injection peut englober différentes définitions. Surace et al. [75], ainsi que Gheisari et al. [51] expliquent bien les différentes définitions possibles du moulage à micro injection dans leurs travaux :

- L'objet a une masse d'environ quelques milligrammes.
- L'objet a des tolérances de cote de l'ordre du micromètre.

- L'objet a une taille générale ne dépassant pas 1mm
- Certaines parties de l'objet ont des dimensions de l'ordre du micromètre.

Moguedet et al. [65] utilisent une géométrie qui se rapprochent de la définition du moulage à micro-injection qui nous intéressent. En effet, leur géométrie est une plaque axisymétrique composée de microtextures à sa surface, comme nous pouvons le voir sur la figure 2.8. Dans leurs travaux, ils utilisent des microtextures rectangulaires de taille variées : ils sont partis de microtextures d'environ 1 millimètre pour les plus grosses et sont descendus jusqu'à environ 0,05 mm. Leurs simulations avec Moldflow[®] et COMSOL[®] donnent des résultats qui sont intéressants, mais malheureusement encore un peu éloignés de la réalité quant au remplissage des microtextures.

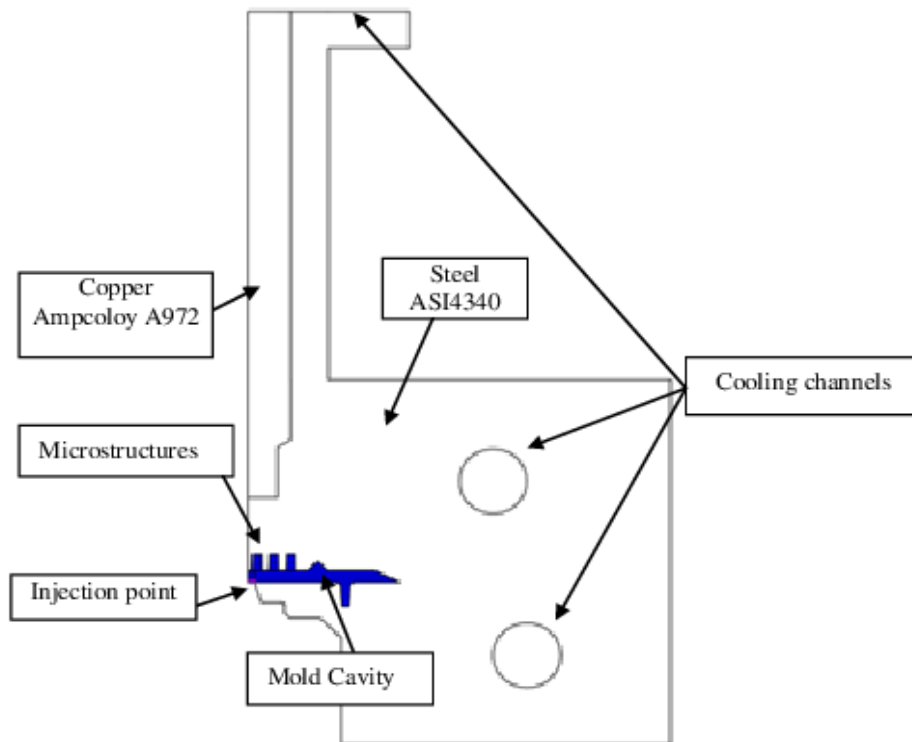


FIGURE 2.8 – Représentation en coupe du moule axisymétrique de l'article de Mael Moguedet et al. [65] Les microtextures testées dans cet article sont de dimensions comprises entre 0,05 mm et 0,2 mm.

En effet, selon Moguedet, COMSOL sous estime le remplissage des microtextures, alors que Moldflow les surestime. Ce document est celui qui se rapproche le plus du travail que

l'on cherche à effectuer avec ce projet. En effet, la géométrie du moule utilisé dans cet article est un disque composé de microtextures sur la face supérieure. De plus, les résultats fournis dans l'article sont les plus précis obtenus lors de la recherche bibliographique, ce qui fait de cet article un apport intéressant à ce projet.

Choi et al. [50] font des simulations avec des microtextures cylindriques de taille comprises entre 0,1 et 100 μm comme on peut le voir sur la figure 2.9. Leurs résultats ne sont pas entièrement communiqués mais ils mettent en évidence l'importance de la vitesse de glissement à la paroi pour des micro-cavités de l'ordre de 10 μm ou moins ainsi que de l'importance de la capillarité pour des cavités de l'ordre des submicrons. De même que pour les articles de Kolev Angelov [48] et Moguedet [65], la géométrie dans cet article est intéressante : une plaque constituée de microtextures est simulée, ce qui se rapproche de la géométrie choisie dans ce travail. L'utilisation d'une simulation multi-échelle en fait également un apport intéressant pour ce projet.

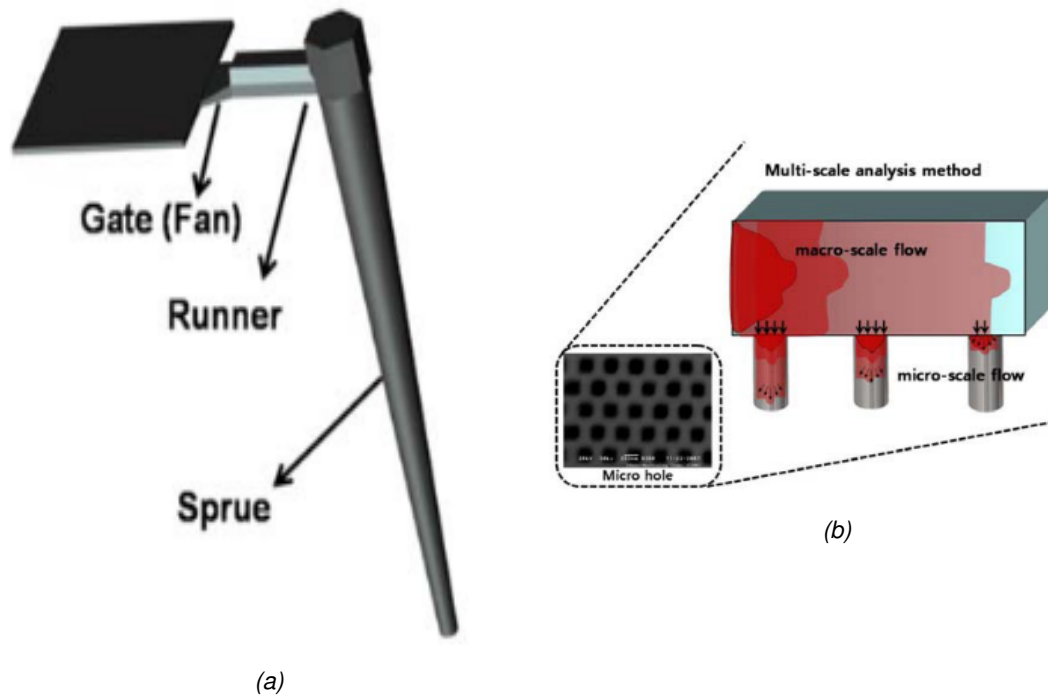


FIGURE 2.9 – Géométrie de l'article de Choi et al. [50]. (a) : Géométrie complète de la plaque (b) : Organisation multi-échelle entre le domaine macroscopique et microscopique.

Donggang et al. [53] ont travaillé avec une cavité ayant une épaisseur variable allant de $0,1 \mu\text{m}$ à $1000 \mu\text{m}$, suivant une échelle logarithmique uniforme présentée en figure 2.10. Ils concluent dans leurs travaux que les microtextures sont remplies de façon quasi-isotherme malgré les températures élevées à cause du ratio important de diffusion de chaleur dans les micro-cavités. Ils concluent également que la tension de surface n'est pas à prendre en compte dans le moulage à micro-injection mais que la viscosité à l'échelle microscopique ainsi que le glissement aux parois sont des paramètres importants à prendre en compte. En effet, selon eux le glissement aux parois est important pour le remplissage de microtextures, car sans cela la quantité d'efforts en cisaillement à l'intérieur des textures est trop importante.

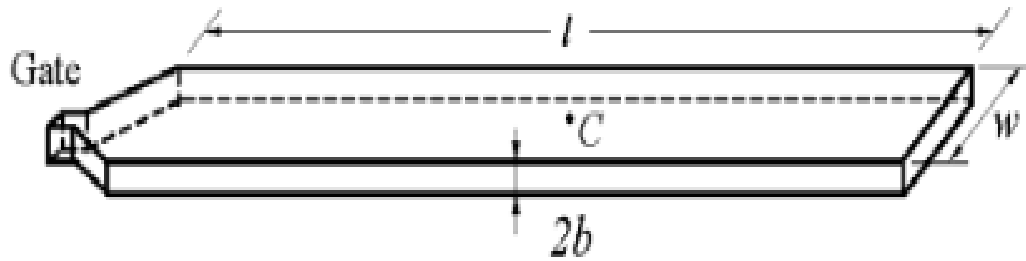


FIGURE 2.10 – Géométrie choisie pour l'étude de l'écoulement dans un micro-canal par Donggang et al. [53]. L'épaisseur b de la géométrie est soumise à des variations entre $0,1\mu\text{m}$ et $10\mu\text{m}$. La longueur l et la largeur w ne sont pas communiquées.

Grzybowski et al. [76] ont travaillé sur des mini-canaux de taille de l'ordre du millimètre (voir figure 2.11). Ils ont testé plusieurs types de flux avec des bulles afin d'observer le comportement de ces derniers dans un conduit microscopique. Ce travail apporte des informations intéressantes sur le comportement du fluide à l'intérieur d'un micro-canal et à la jonction entre les micro-canaux et les canaux macroscopiques. Ces résultats sont intéressants à considérer dans le cas d'une simulation multi-échelle.

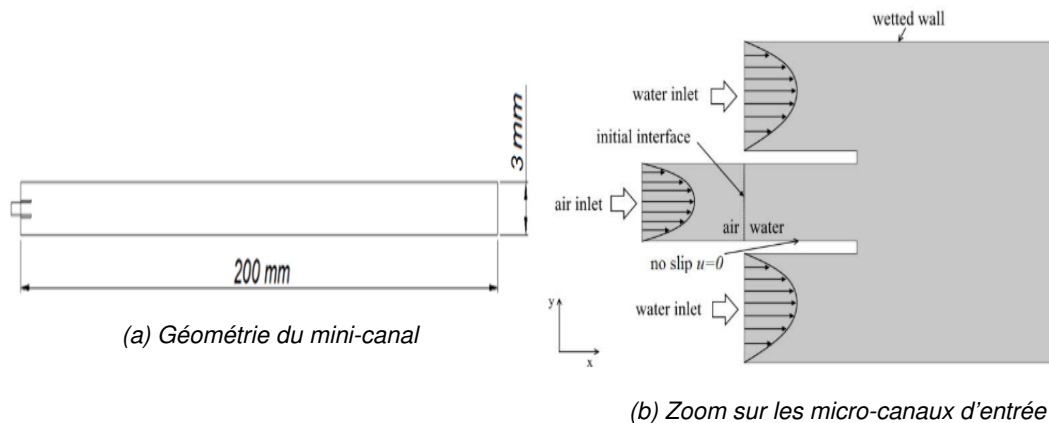


FIGURE 2.11 – Géométrie de l'article de Grzybowski et al. [76] pour leur expérimentation sur la propagation de bulles dans des micro-canaux. Les bulles sont injectées dans le canal du milieu ayant pour diamètre $d = 0,7\mu\text{m}$

Ils en ont déduit que le flux à la sortie des micro-canaux était instable et causait des modifications chaotiques dans le comportement des bulles à la sortie des mini-canaux.

Gheorghe et al. [54] ont quant à eux travaillé sur la simulation numérique du moulage à injection d'un prototype d'outil médical en polymère microscopique présenté sur la figure 2.12, afin d'optimiser la fabrication de ce dernier et d'en réduire les coûts de production. La figure 2.12 présente une géométrie assez éloignée de ce qui nous intéresse pour ce projet, cependant les résultats obtenus lors de ces travaux sont intéressants à considérer pour notre problème.

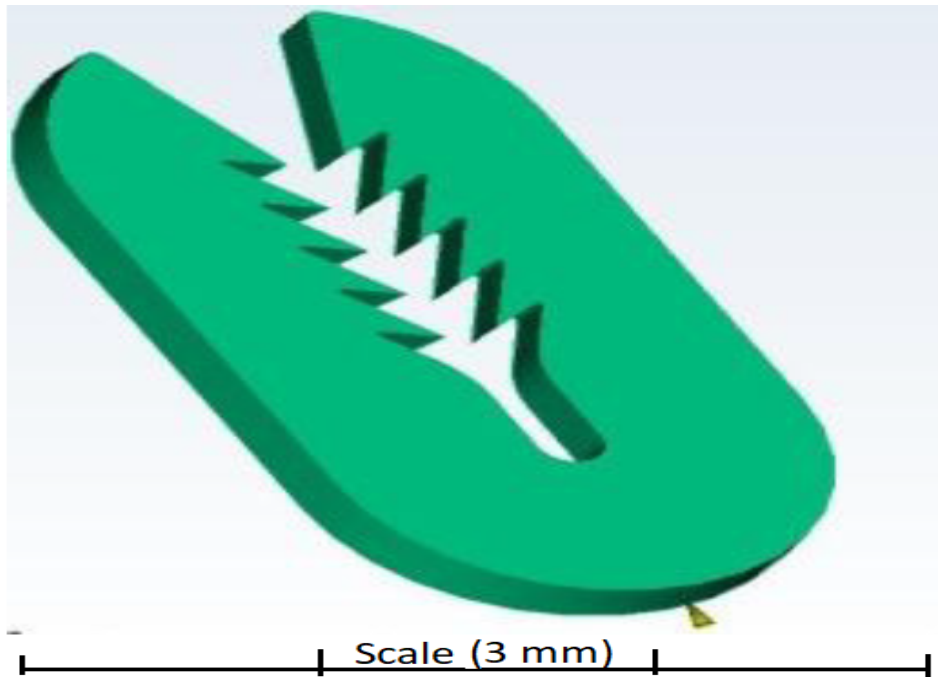


FIGURE 2.12 – Outil médical en polymère de l'article de Gheorghe et al. [54]. L'outil médical a des dimensions de l'ordre du millimètre.

En effet, selon eux le temps d'injection a une importance particulière pour le temps de solidification de la pièce. La vitesse d'injection est également un paramètre extrêmement important à prendre en compte : en effet, si celle-ci est trop importante, il y a un risque de dégradation du moule ou de brûlure du matériau. De même, si la vitesse d'injection est trop faible, la solidification du matériau peut arriver trop vite par rapport au remplissage de la pièce. Les résultats obtenus sont néanmoins intéressants car ils ont été en mesure de trouver les paramètres optimaux pour la simulation et la fabrication de l'outil médical

standard présenté plus haut et ont ainsi pu réduire énormément les coûts de production, en plus d'avoir de nombreuses informations sur le comportement du matériau à l'aide de Moldflow®.

Hill et al. [46] ont travaillé avec une géométrie en forme d'étoile dont les branches sont des micro-pompes présentées en figure 2.13.

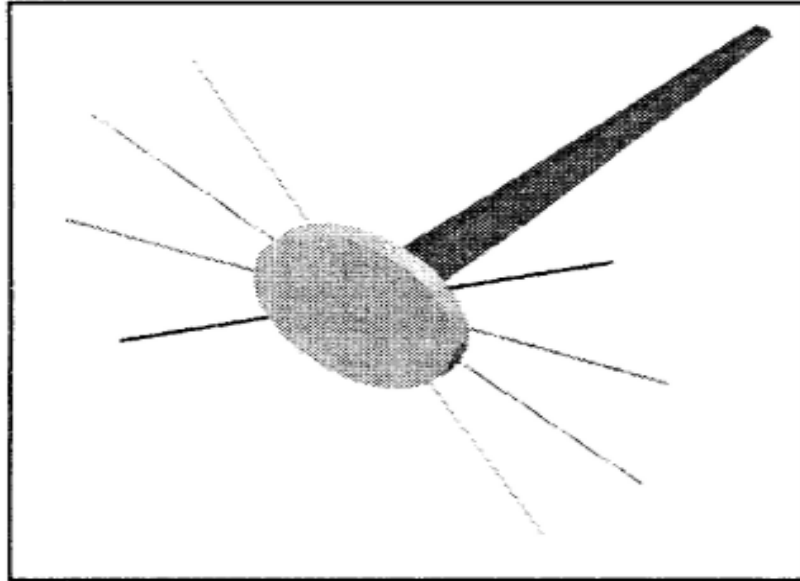


FIGURE 2.13 – Géométrie de la micropompe en forme d'étoile [46]. La plaque circulaire de base a 3 mm de d'épaisseur et 10 mm de rayon. Les micro-canaux rectangulaires situés au niveau de la base circulaire sont longs de 37 mm et ont une largeur de 400 μm .

Ils ont étudié le taux de remplissage des micro-pompes en fonction des différentes pressions d'entrée appliquées (1000, 1175, 1375 et 1925 bars) et des profondeurs des canaux. Comme ils avaient prévu, le taux de remplissage des canaux augmentent lorsqu'ils augmentent la pression et la profondeur des canaux, cependant, ils mettent également en évidence le fait que la simulation prédit un taux de remplissage plus élevé que la réalité. En effet, la simulation en 2 dimensions de la géométrie ne permet pas une bonne prédiction du flux de chaleur et ainsi le refroidissement du polymère est sous estimé par le logiciel. Ils mettent en évidence que l'étude 3D prévoit de façon plus réaliste le remplissage que l'étude 2D.

2.8.4 Validation des modèles numériques

La validation d'une simulation numérique est très importante. En effet, la simulation numérique est un outil puissant qui permet de nombreuses choses mais il y a toujours un risque que le résultat fourni par la simulation ne soit pas assez proche de la réalité. Il est important d'éviter ce genre de problèmes pour obtenir des résultats qui seront capables d'être reproduits dans la réalité.

Il existe de nombreuses façons de valider un modèle numérique. La plus répandue est bien évidemment de vérifier les résultats obtenus, tant qualitatifs que quantitatifs, avec l'expérimentation. Ce type de vérification a été utilisé notamment par Gheisari et al. [51, 77], ainsi que d'autres scientifiques dans différents articles [52, 56, 78, 79]. La comparaison des résultats de la simulation numérique avec les résultats expérimentaux permettrait d'affirmer avec plus de certitudes que le modèle numérique développé est le bon.

La difficulté de la validation est d'autant plus présente dans les problèmes où il n'existe pas de données expérimentales pour corroborer aux résultats de la simulation.

Dans sa thèse, Aleksandar Kolev Angelov utilise une géométrie avec des profondeurs de textures multiples afin de tester la validité de son modèle numérique [48]. Il a reproduit sa géométrie (voir figure 2.14) avec l'aide du logiciel SolidEdge, et a vérifié la similitude des résultats entre les logiciels Moldflow MPI® et COMSOL Multiphysics®.

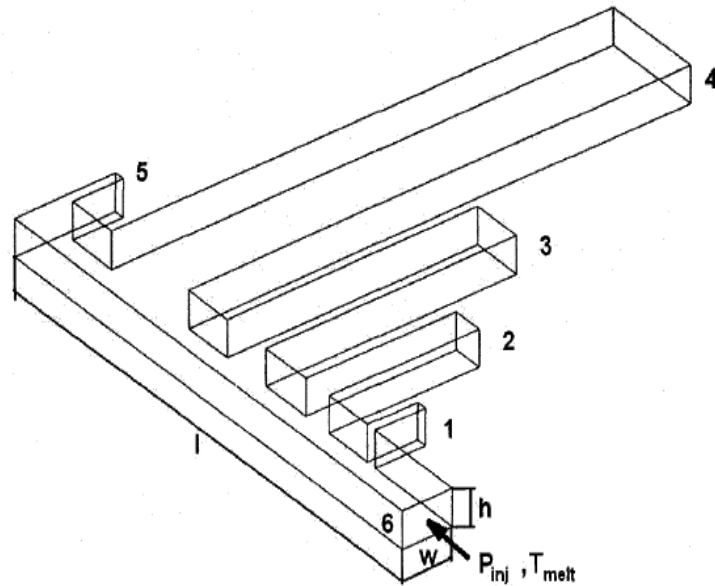


FIGURE 2.14 – Représentation schématique de la géométrie 3D utilisée par Kolev Angelov [48] pour ses simulations. Celle-ci consiste en six canaux de longueur (l) et de largeur (w) variables, mais de hauteur ($h = 30 \mu m$) similaire. Pour chaque canaux, les dimensions en micromètres (w, l) sont comme suit : (1)-(10,50), (2)-(30,150), (3)-(50,250), (4)-(100,500), (5)-(10,50), (6)-(50,500)

Katrina Donovan [62] a également choisi une méthode purement numérique afin de valider sa simulation dans son mémoire. En effet, n'ayant pas accès aux données expérimentales de son projet, cette dernière a effectué sa validation en analysant deux fois numériquement les résultats issus de ses différents fichiers de simulation. La similitude des résultats semble indiquer que les simulations sont correctes, mais elle précise bien que de plus amples vérifications et validations ne sont pas possibles pour son projet.

Chapitre 3

MÉTHODOLOGIE

3.1 Méthodologie de résolution

La méthodologie de résolution choisie pour ce projet est inspirée de celles des articles, expliquées dans la section 2.7.

Comme indiqué dans le chapitre précédent (section 2.7), les logiciels sélectionnés pour notre étude sont les logiciels Solidworks®, Autodesk Moldflow® et COMSOL 5.4®.

3.1.1 Présentation des logiciels

3.1.1.1 Solidworks®

Solidworks® est un logiciel de conception 3D racheté en 1997 par l'entreprise Dassault Systèmes. Il permet de travailler sur la conception d'une pièce, sur un assemblage de plusieurs pièces et/ou sur une mise en plan [80]. Pour ce projet, Solidworks® a permis la reproduction de l'isolateur électrique testé ensuite avec le logiciel Moldflow®, présenté ci-après.

3.1.1.2 Moldflow Insight®

Moldflow® est un logiciel de simulation numérique par éléments finis spécialisé dans la simulation du moulage à injection de polymères. Il a été conçu par l'entreprise Autodesk®.

Ce logiciel contient une base de données de matériau très importante, permettant de modéliser le comportement de plusieurs polymères et plastiques au sein d'un moule. Cependant, il est plutôt complexe à maîtriser et à personnaliser, car la plupart des paramètres dépendent les uns des autres et les matériaux sélectionnés imposent certaines restrictions dans les modifications de ces paramètres. De plus, après avoir étudié les différentes tailles de textures que l'on peut modéliser avec Moldflow, nous avons pu constater qu'il n'est plus possible de modéliser les textures en dessous de 0,5 mm. En effet, ces dernières ne sont pas reconnues par le logiciel comme faisant partie de la géométrie, mais sont plutôt considérées comme des défauts de conception trop nombreux pour être corrigés. Il a donc été nécessaire de trouver un logiciel permettant de modéliser des textures de taille inférieure à 0,5 mm.

3.1.1.3 COMSOL Multiphysics®

Le logiciel COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique par éléments finis conçu par l'entreprise du même nom. Il permet le couplage de plusieurs physiques entre elles (fluide, thermique, ...etc) et permet une grande personnalisation des modèles que l'on simule. De plus, il nous permet de modéliser des textures à des tailles microscopiques, ce qui est très intéressant pour ce projet. Il est cependant impératif de connaître avec précision les paramètres de notre projet, ainsi que les équations mathématiques qui le gouvernent et de les comprendre rigoureusement. En effet, COMSOL Multiphysics a besoin d'une description assez précise de la géométrie et des paramètres de simulation afin de donner des résultats

proches de la réalité. Il est également nécessaire, comme avec tous logiciels de simulation numérique, de vérifier les résultats obtenus à l'issue des simulations obtenues par COMSOL Multiphysics, à l'aide de cas test et d'expérimentations.

3.2 Géométrie de l'étude

Pour ce projet, nous considérons un isolateur électrique de la compagnie K-Line Insulators Limited. D'après les dimensions fournies par l'entreprise, il a été possible de dessiner l'isolateur sur Solidworks® afin de pouvoir lancer des simulations.

L'isolateur est composé de plusieurs jupes d'environ 150 mm de diamètre, mais seule une jupe a été considérée pour ce projet : ceci permet de simplifier le problème tout en le gardant suffisamment proche de la réalité. La figure 3.1 présente la géométrie considérée pour ce projet :

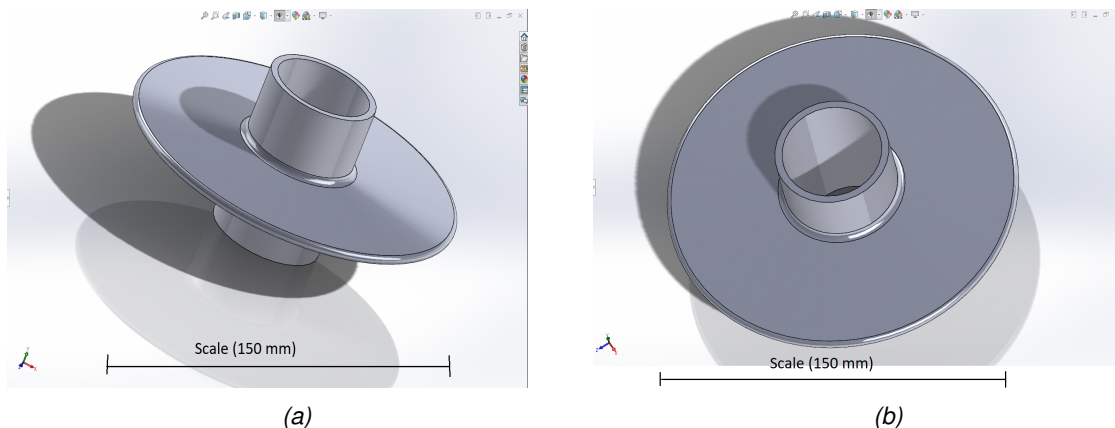


FIGURE 3.1 – Géométrie de l'isolateur utilisée pour les simulations avec Moldflow. Cette dernière est composée d'une seule jupe de l'isolateur, de diamètre 150 mm. Le diamètre intérieur est d'environ 40 mm et la longueur de la jupe simulée est d'environ 20 mm.

Les microtextures prises en considération pour ce projet ont été placées sur la face supérieure des jupes. D'après les articles consultés, nombreux s'accordent sur le fait que l'on peut considérer qu'en dessous de 200 μm , on se trouve dans le domaine microscopique, comme le confirme le chapitre de livre écrit par Surace et al. [75].

Afin de remplir l'objectif fixé par l'entreprise, à savoir de mouler des isolateurs super-hydrophobes, il est donc important de bien tenir compte des dimensions de ces microtextures. La figure 3.2 présente ici les différentes textures considérées pour ce projet dans un premier temps : pour des raisons de facilité de remplissage et de démoulage, nous avons considéré des microtextures rectangulaires et triangulaires ordonnées (c'est-à-dire de tailles similaires).

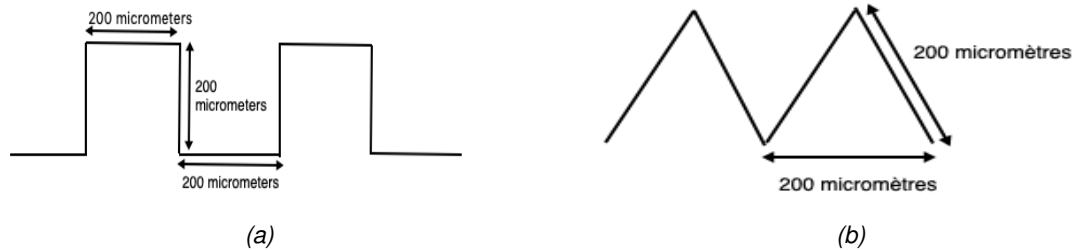


FIGURE 3.2 – Dimensions maximales des textures sur la surface de l'isolateur. (a) : Textures rectangulaires de 0,2 mm. (b) : Textures triangulaires de 0,2 mm.

Dans le cadre de différents projets avec K-Line Insulators Limited, plusieurs types de textures ont été développées, mais pour des raisons de simplification du problème, après avoir testé plusieurs types de textures avec le logiciel Moldflow, seules des microtextures rectangulaires ont été considérées pour ce projet lors des simulations avec COMSOL Multiphysics.

La taille des microtextures a été diminuée progressivement, lors des étapes de familiarisation des logiciels, de plusieurs centimètres à environ 0,1 mm, dans une optique tout d'abord d'essai/erreur, afin de voir ce qui fonctionnait le mieux pour notre projet, mais également afin de déterminer la tolérance des différents logiciels que nous avons testés.

3.3 Développement du modèle principal et validation

Le logiciel COMSOL Multiphysics 5.4[®] nous a permis de modéliser des micro-textures à la surface de la jupe de l'isolateur. Pour des raisons de rapidité de simulation, des textures

d'au moins 0,2 mm ont été simulées. Par un processus d'essai-erreur, une simulation numérique a ensuite été développée avec COMSOL Multiphysics 5.4[®], tout d'abord en observant le comportement du polymère avec une température fixe et ambiante en sein du moule, puis en observant le comportement du polymère lorsque le moule est chauffé.

À chaque étape principale de ces simulations, il a été nécessaire de valider les résultats obtenus à l'aide de cas tests d'articles, ou encore d'expérimentation. Pour la validation de notre simulation COMSOL Multiphysics 5.4[®], l'une des simulations présentées dans l'article de M. Héту et al. [61] a été sélectionnée. En effet, cet article présente des similarités avec notre projet et a l'avantage de donner des résultats assez complets pour qu'on puisse les comparer avec les nôtres. En effet, cet article étudie la simulation du remplissage d'un tube par un polymère thermodurcissable en fournissant des informations quantitatives et qualitatives de leurs résultats.

3.4 Modèles mathématiques adéquats au projet

3.4.1 Équations de dynamique des fluides

Comme expliqué dans la partie 2.6, beaucoup d'auteurs utilisent le modèle de Hele-Shaw pour résoudre leur problème de moulage à injection. Ce modèle est largement employé par les logiciels de simulation de moulage à injection tels que Autodesk Moldflow[®] et CadMould [22]. Il fait appel à de nombreuses simplifications pour résoudre les écoulements :

- Les forces de viscosité étant beaucoup plus importantes que les forces d'inertie, ces dernières sont ignorées ;
- La convection de chaleur dans la direction de l'épaisseur est ignorée ;
- La conduction est légèrement similaire à la convection dans la direction du flux de

polymère fondu, on considère donc qu'elle est ignorée.

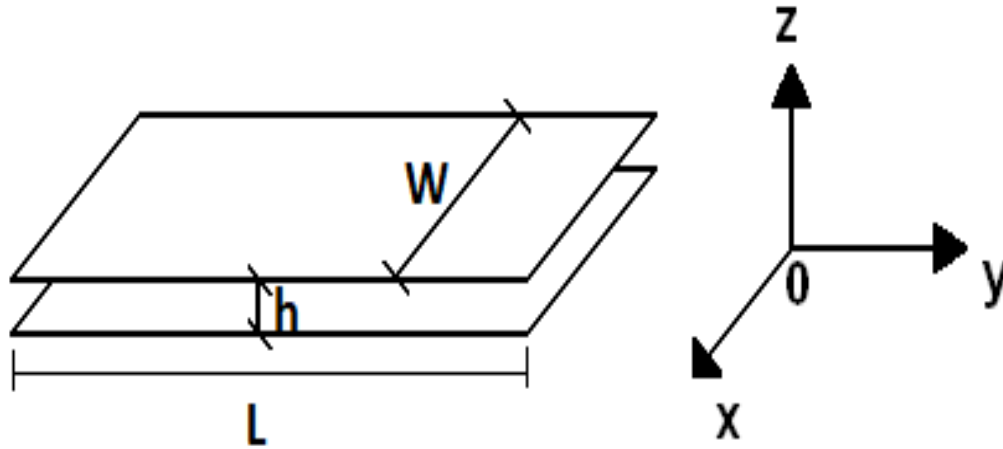


FIGURE 3.3 – Cellule de Hele-Shaw [95].

Comme le montre la figure 3.3, le modèle de Hele-Shaw considère le passage du fluide choisi entre deux plaques infinies. On a donc dans ce modèle les conditions aux limites suivantes :

- $\frac{h}{L} \ll 1$
- $\frac{h}{W} \ll 1$ (Avec L la longueur de la plaque, W la largeur de la plaque et h la distance entre les deux plaques.)
- Les forces d'inerties sont très petites devant les efforts de cisaillement causés par la viscosité.

Les équations fondamentales du modèle de Hele-Shaw résultent de l'adimensionnement des équations de Navier-Stokes. En effet, l'équation de continuité nous dit :

$$\nabla \cdot \underline{u} = 0 \quad (3.1)$$

et les équations de Navier Stokes simplifiées sont telles que :

$$\rho \frac{\partial \underline{u}}{\partial t} + \rho \underline{u} \cdot \nabla \underline{u} = -\nabla p + \eta \nabla^2 \underline{u} \quad (3.2)$$

$$\text{où } \underline{u} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$$

u, v et w sont les composantes du vecteur vitesse dans la cellule de Hele-Shaw, et $\vec{i}$, $\vec{j}$ et $\vec{k}$ sont les vecteurs directeurs selon les composantes d'espace x, y et z respectivement. Pour obtenir les équations du modèle de Hele Shaw, on commence par adimensionner les différentes composantes de vitesse et de position pour obtenir les variables suivantes :

$$\tilde{x} = \frac{x}{L} \quad \tilde{y} = \frac{y}{L} \quad \tilde{z} = \frac{z}{h} \quad (3.3)$$

et

$$\tilde{u} = \frac{u}{V} \quad \tilde{v} = \frac{v}{V} \quad \tilde{w} = \frac{w}{V} \quad (3.4)$$

L'obtention des équations de Hele-Shaw se fait en implémentant ces grandeurs adimensionnées dans les équations de Navier-Stokes et l'équation de continuité. Les conditions aux limites établies plus haut permettent ensuite de simplifier les équations et l'on obtient donc les équations de Hele-Shaw suivantes :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (3.7)$$

Retenir les simplifications et les conditions aux limites de ces logiciels de simulation de moulage à injection est important pour l'analyse des résultats : en effet, un résultat qui semble difficile à expliquer peut trouver sa réponse dans les équations choisies par le logiciel.

Au vu de la géométrie que nous avons choisi pour ce projet, à savoir un isolateur électrique, et les différentes simplifications inhérentes au modèle de Hele-Shaw, il a été décidé que le comportement du fluide serait mieux représenté par les équations de Navier-Stokes. En effet, ces équations sont les plus utilisées dans les articles les plus récents, et le modèle de Hele-Shaw utilise des simplifications qui ne sont pas valables dans notre cas.

Cependant, avant de se lancer dans la description des équations de Navier-Stokes utilisées, il est tout d'abord important de connaître le nombre de Reynolds de notre fluide afin de savoir dans quel régime celui-ci évolue lors de l'écoulement.

Le nombre de Reynolds s'écrit comme suit [81] :

$$Re = \frac{\rho V l}{\mu} \quad (3.8)$$

Où ρ est la densité du fluide, V est la vitesse du fluide, l est la longueur caractéristique de notre moule et μ est la viscosité du matériau.

Pour notre projet, la longueur caractéristique choisie pour calculer le nombre de Reynolds est le diamètre d'une jupe de l'isolateur, car c'est la distance que va devoir parcourir l'écoulement pour remplir la jupe de l'isolateur, qui correspond donc à $l = 156,16mm$

D'après la mécanique des fluides[10], il est reconnu que :

- Un $Re < 2000$ signifie que le régime de l'écoulement est laminaire
- Un $2000 < Re < 3000$ signifie que le régime de l'écoulement est transitoire
- Un $Re > 3000$ signifie que le régime de l'écoulement est turbulent

Dans notre projet le calcul du nombre de Reynolds nous montre que ce dernier est inférieur à 2000. En effet, après calcul, nous obtenons un nombre de Reynolds tel que $Re = 0,00114$. Un nombre de Reynolds de cet ordre signifie que nous sommes donc dans un régime laminaire pour l'écoulement du LSR dans le moule. Plus particulièrement, un nombre de Reynolds tel que $Re \ll 1$ signifie que l'écoulement de notre projet est gouverné par la viscosité et qu'il est dit rampant [82]

Après avoir déterminé le nombre de Reynolds, il est important de définir la forme des équations fluides que nous allons devoir utiliser. Comme souligné précédemment, les équations de Navier Stokes seront utilisées pour décrire le comportement du fluide dans ce projet. Ces formules permettent de décrire les liens entre la vitesse, la pression et la viscosité d'un fluide [10]. Elles sont composées d'un ensemble d'équations telles que présentées ci-après :

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla u = \nabla [-p \cdot I_d + \mu (\nabla u + (\nabla u)^T) - (\frac{2\mu}{3} - K_{dv})(\nabla[u])I_d] \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(u) = 0 \quad (3.10)$$

3.4.2 Équations permettant le suivi du front d'écoulement

Ce qui nous intéresse le plus dans ce projet est de savoir si le polymère remplira correctement le moule ainsi que les textures qui le composent. Il est donc important de prendre en compte le suivi de l'écoulement, et notamment le suivi du front d'écoulement du fluide.

Concernant cet aspect, les résultats des travaux de recherches divergent, mais nombre d'entre eux [65, 76] s'accordent à utiliser la méthode des ensembles de niveau (level set method), qui est une méthode assez robuste du point de vue numérique. Cette méthode est définie par les équations suivantes [83] :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \nabla[\phi] = \gamma \nabla[\epsilon \nabla[\phi] - \phi(1 - \phi) \frac{\nabla[\phi]}{|\nabla[\phi]|}] \quad (3.11)$$

Où ϕ , ϵ et γ sont des valeurs caractéristiques de la méthode des ensembles de niveau :

— ϕ est la fonction caractéristique du polymère telle que

$$\phi(x, y) = 1 \text{ si l'on est en présence de polymère ;}$$

$$\phi(x, y) = 0 \text{ sinon}$$

— ϵ est le paramètre contrôlant l'épaisseur de l'interface et est calculée par COMSOL comme suit :

$$\epsilon = \text{taille maximale des éléments du maillage}/2$$

— γ est le paramètre de réinitialisation qui permet de gérer la stabilité du modèle. En général, COMSOL considère que le paramètre de réinitialisation est égal à 1.

Ce modèle permet le suivi du front d'écoulement et ainsi permet de voir si le polymère remplit correctement le moule et les textures.

Afin de calculer l'écoulement du fluide au sein de la cavité du moule, Héту et al. [61] ont eux considéré une variation de la méthode des volumes de fluide connue sous le nom de fonction de pseudo-concentration F.

La méthode des volumes de fluide (VOF) consiste à discrétiser la géométrie en différentes cellules [22]. La méthode VOF va ainsi définir une fonction unité qui prendra la valeur 1 dans une cellule où le fluide est présent et 0 dans une cellule où le fluide est absent. La particularité de cette méthode est que chaque cellule étant seulement partiellement remplie du fluide aura pour valeur de fonction une valeur comprise entre 0 et 1 qui représentera la fraction volumique du fluide.

Cette fonction de pseudo-concentration utilisé par Héту et al. [61] permet de définir une fonction $F(x,t)$ qui est plus grande qu'une valeur critique appelée F_c si le fluide est présent

dans la cellule, et plus petite dans le cas inverse. F_c est une valeur critique définie par le modèle de pseudo-concentration définie par Hétu et al. [61].

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \cdot \nabla F = 0 \quad (3.12)$$

La fonction F est transportée en utilisant la solution des équations de Stokes généralisée. Le volume où $F > F_c$ représente le volume où la cavité est remplie, et l'inverse, le volume où la cavité est vide.

La différence majeure entre la méthode des volumes de fluides et la méthode level set est que la première (la méthode VOF) a une meilleure conservation de la masse, tandis que la deuxième a un meilleur suivi de la courbure de l'interface entre les fluides. Pour remplir l'objectif de ce projet, il est intéressant pour nous de savoir si le fluide remplit les textures dans le moule, nous allons donc travailler avec la méthode level set.

3.4.3 Comportements visqueux et température

L'utilisation d'un polymère fondu nous oblige à nous intéresser à la rhéologie du matériau que nous allons utiliser. La plupart des polymères n'étant pas considéré comme des fluides newtoniens, les équations utilisées devront prendre en considération cette notion et fournir une modélisation mathématique correcte des phénomènes fluidiques des polymères. En effet, un fluide est dit newtonien lorsque les contraintes observées à l'intérieur du fluide sont linéairement proportionnelles à la vitesse à l'intérieur du fluide, avec pour facteur de proportionnalité la viscosité [22]. Ainsi, dans un fluide newtonien, la viscosité ne dépend pas des contraintes extérieures qu'on lui applique et la loi de viscosité de Newton s'écrit :

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad (3.13)$$

où τ est le tenseur des contraintes de cisaillement, μ est la viscosité dynamique du fluide et $\frac{dv}{dy}$ est le taux de déformation du fluide.

Les fluides dont la viscosité du fluide est dépendante du cisaillement ayant lieu à l'intérieur de celui-ci sont appelés quant à eux des fluides non-newtoniens et sont régis par la loi de viscosité de Newton suivante [84] :

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dy} \right)^n + B \quad (3.14)$$

Il existe plusieurs types de fluides visqueux non newtonien :

- les fluides rhéofluidifiants, qui représentent 90% des fluides non-newtoniens. Ces fluides voient leur viscosité diminuer avec l'augmentation du taux de cisaillement. Dans ce genre de fluide on peut donner comme exemple le ketchup.
- Les fluides rhéoépaississants, pour lesquels la viscosité augmente lorsque le taux de cisaillement augmente. Comme exemple, on peut citer les sables mouvants.
- Les liquides à seuils. Ces derniers deviennent liquides seulement à partir du moment où la contrainte appliquée au fluide dépasse un certain seuil de contrainte. Dans le cas contraire, ces fluides restent à l'état solide.
- Les fluides thixotropes et antithixotropes

De plus, les polymères thermodurcissables subissent également un phénomène de réticulation lorsqu'ils sont chauffés. La réticulation d'un polymère thermodurcissable est le phénomène de création de liaisons chimiques au sein d'un polymère. Une fois un polymère thermodurcissable réticulé, il a adopté sa forme finale et ne peut être moulé à nouveau. Ce processus peut prendre un certain temps, de plusieurs secondes à parfois plusieurs minutes ou heures, alors que le remplissage du moule est un processus plutôt rapide, quelques dizaines de secondes. Nous allons considérer dans ce projet que le remplissage du moule se

fait avant la réticulation du polymère. Il est donc possible d'établir que le lien entre la viscosité du polymère thermodurcissable et la température suit le modèle viscosité de Cross-WLF, qui décrit le comportement des polymères thermoplastiques et qui est très utilisé par le logiciel Moldflow et dans la bibliographie [51, 53, 77].

Le modèle de Cross-WLF lie la viscosité à la température dans un fluide non newtonien, et est défini comme suit :

$$\mu = \frac{\mu_0}{(1 + (\frac{\mu_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*}))^{n-1}} \quad (3.15)$$

Avec :

- μ_0 la viscosité à une température donnée lorsque le ratio de cisaillement est nul
- τ^* et n sont des paramètres du modèle
- $\dot{\gamma}$ est le ratio de cisaillement défini comme suit :

$$\|\dot{\gamma}\| = \sqrt{\frac{1}{2}(2u_y^2 + 2(u_x + v_y)^2 + (2v_x)^2 + 4(\frac{u}{y})^2)} \quad (3.16)$$

La viscosité à cisaillement nul est déterminé par le modèle de WLF suivant :

$$\mu_0 = D_1 \cdot \exp\left[\frac{-A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)}\right] \quad (3.17)$$

Concernant la température, le processus de chauffage du moule opté pour notre projet suit le protocole suivant :

Dans un premier temps, le moule est chauffé jusqu'à ce qu'il atteigne une température de 152 °C (425.15 °K), température communément utilisée dans l'industrie. Une fois celle-ci atteinte, le polymère à température ambiante est injecté dans la cavité du moule. En considérant les effets thermiques, et d'après différents articles, dont celui de Moguedet et al.[65],

on a donc l'équation de convection et de diffusion qui permet de décrire le comportement thermique du fluide :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T - \nabla [k \nabla T] = 0 \quad (3.18)$$

Il existe donc de nombreux modèles mathématiques permettant de décrire le comportement d'un polymère lors du moulage à injection, il est donc important de déterminer les modèles les plus à même de décrire le comportement de notre polymère.

Chapitre 4

RÉSULTATS OBTENUS ET ANALYSE

4.1 Simulations préliminaires avec Moldflow[®]

La première partie de ce projet a consisté à étudier le comportement du fluide à l'aide du logiciel Moldflow[®]. 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[®]

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[®], 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[®].

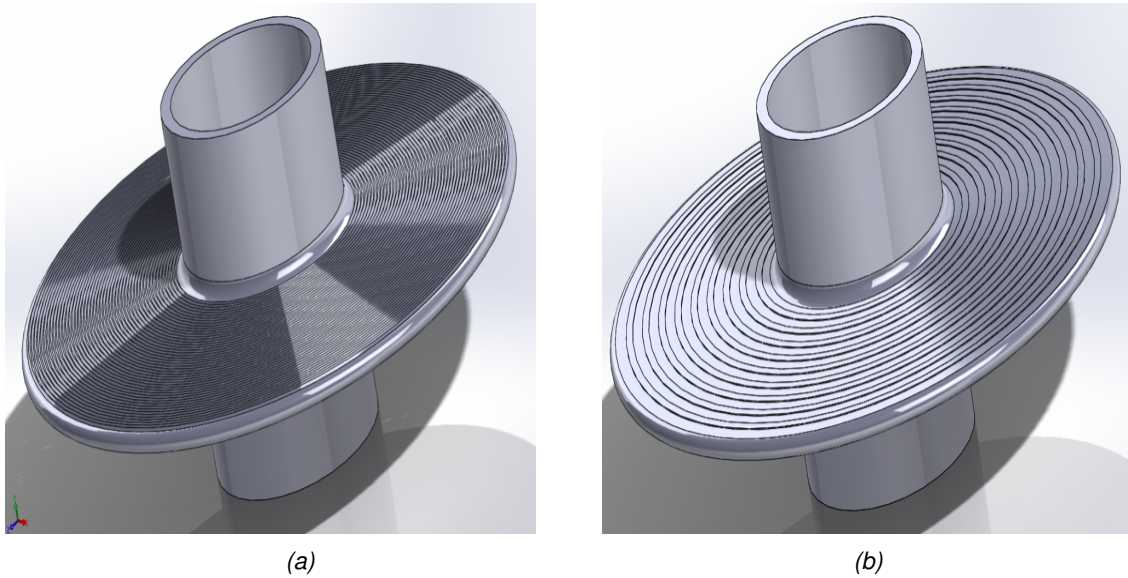


FIGURE 4.1 – Extrait des micro-textures testées avec Moldflow Adviser®. (a) Isolateur composé de microtextures triangulaires de 0,2 mm. (b) Isolateur composé de microtextures rectangulaires de 0,2 mm.

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.

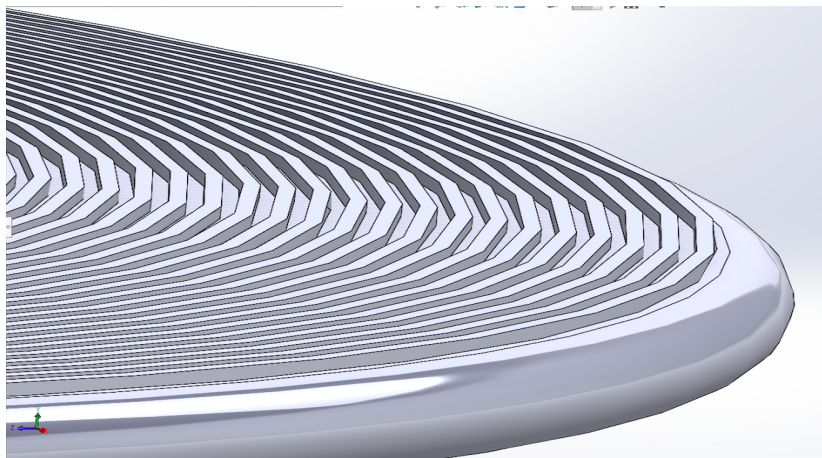


FIGURE 4.2 – Zoom sur la disposition des microtextures dans le logiciel Moldflow®

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.

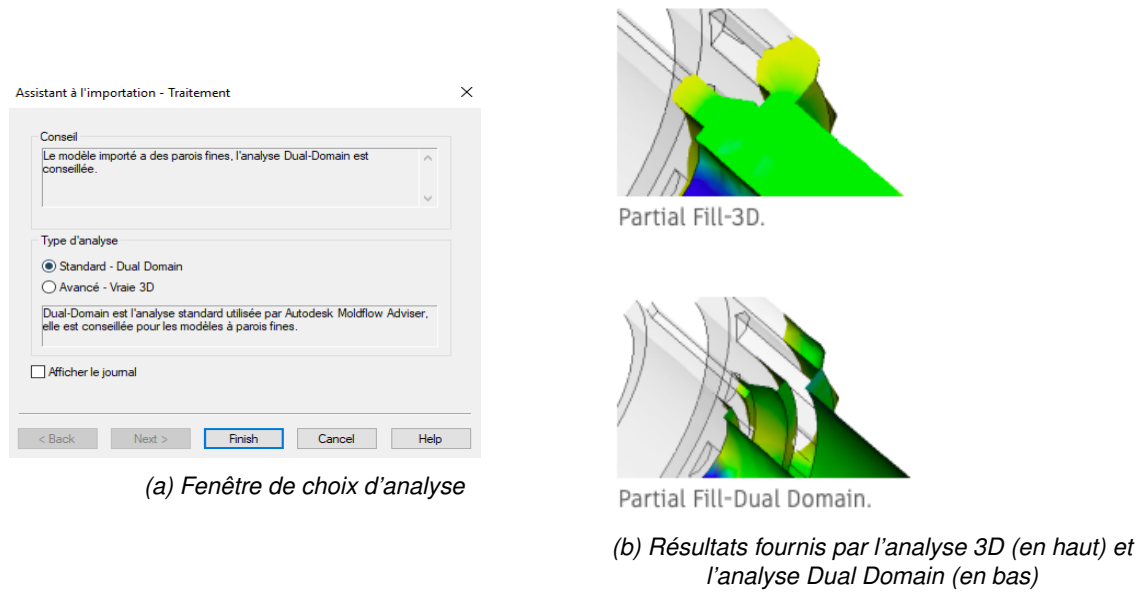


FIGURE 4.3 – Différence entre l'analyse 3D et l'analyse Dual Domain dans le logiciel Moldflow.

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®

Moldflow Insight® 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® 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® n'est plus capable de nous donner de résultats pour des textures en dessous de 0,5 mm, tout comme Moldflow Adviser®. Ceci pourrait être dû à plusieurs raisons :

- Les données rhéologiques de Moldflow® 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® 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.

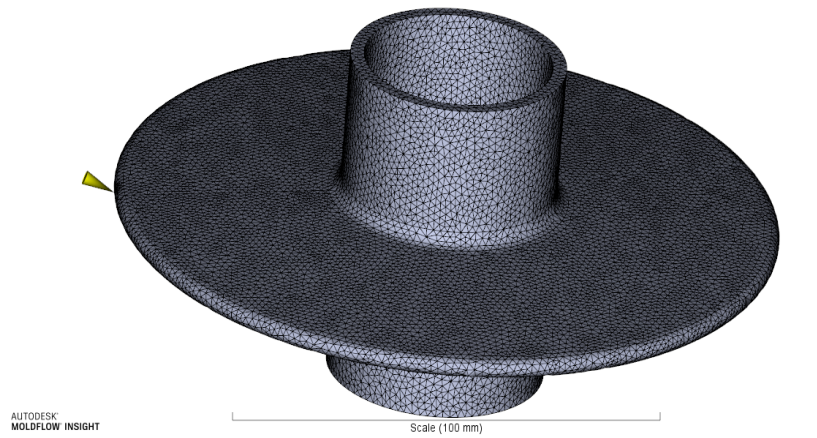


FIGURE 4.4 – Géométrie et maillage sur Moldflow®. La flèche jaune à gauche de l'isolateur représente l'emplacement de la porte d'injection choisie pour cette simulation.

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 $T_{moule} = 152^\circ\text{C}$.
- La température du polymère (ici, l'élastomère de silicone liquide) à l'instant initial est telle que $T_{poly} = 20^\circ\text{C}$.

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® 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

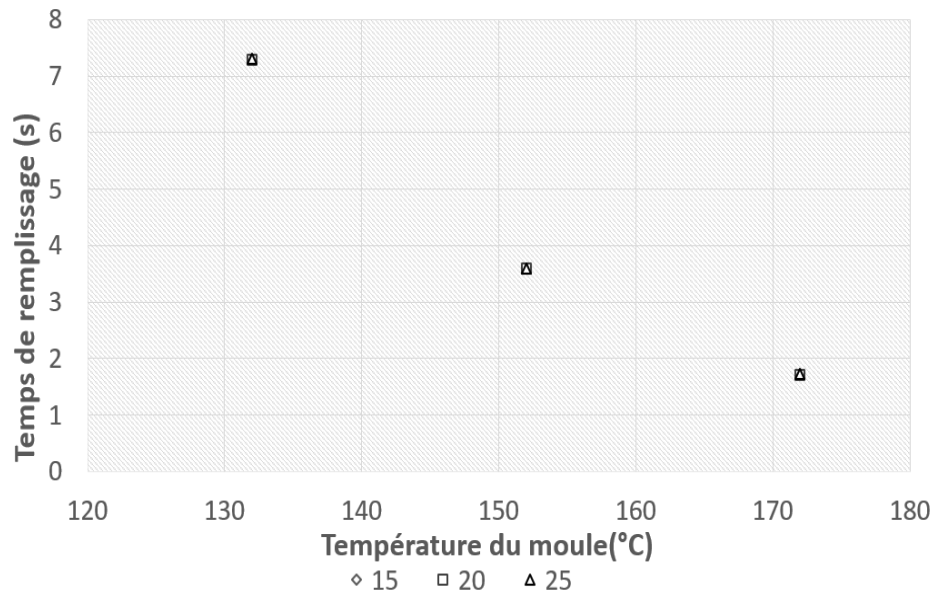


FIGURE 4.5 – Évolution du temps de remplissage en fonction des températures du moule et du polymère. Les températures de moule testées sont 172 °C, 152 °C et 132 °C. Les températures de polymères testées sont 25 °C, 20 °C et 15 °C.

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

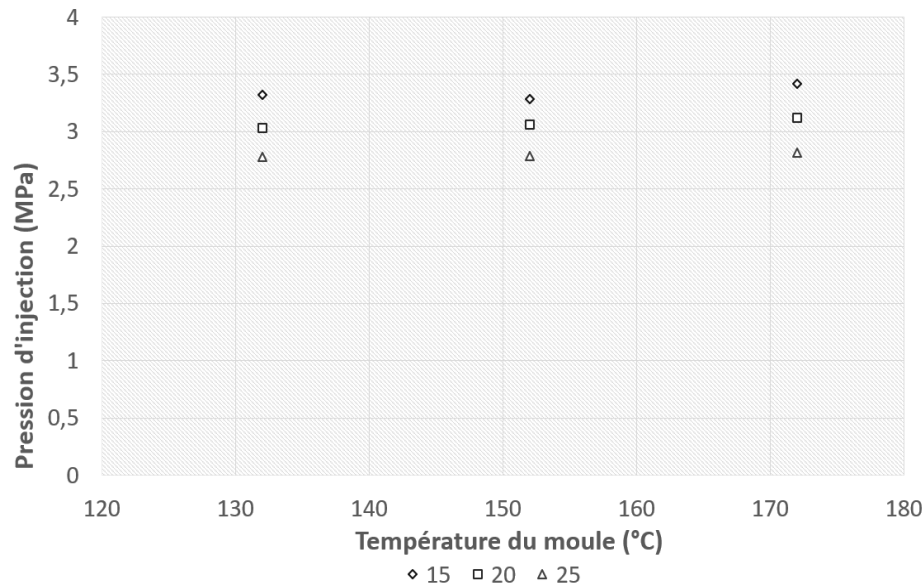


FIGURE 4.6 – Évolution de la pression d'injection moyenne en fonction des températures du moule et du polymère. De même, les températures de moule testées sont 172 °C, 152 °C et 132 °C. Les températures de polymères testées sont 25 °C, 20 °C et 15 °C.

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.

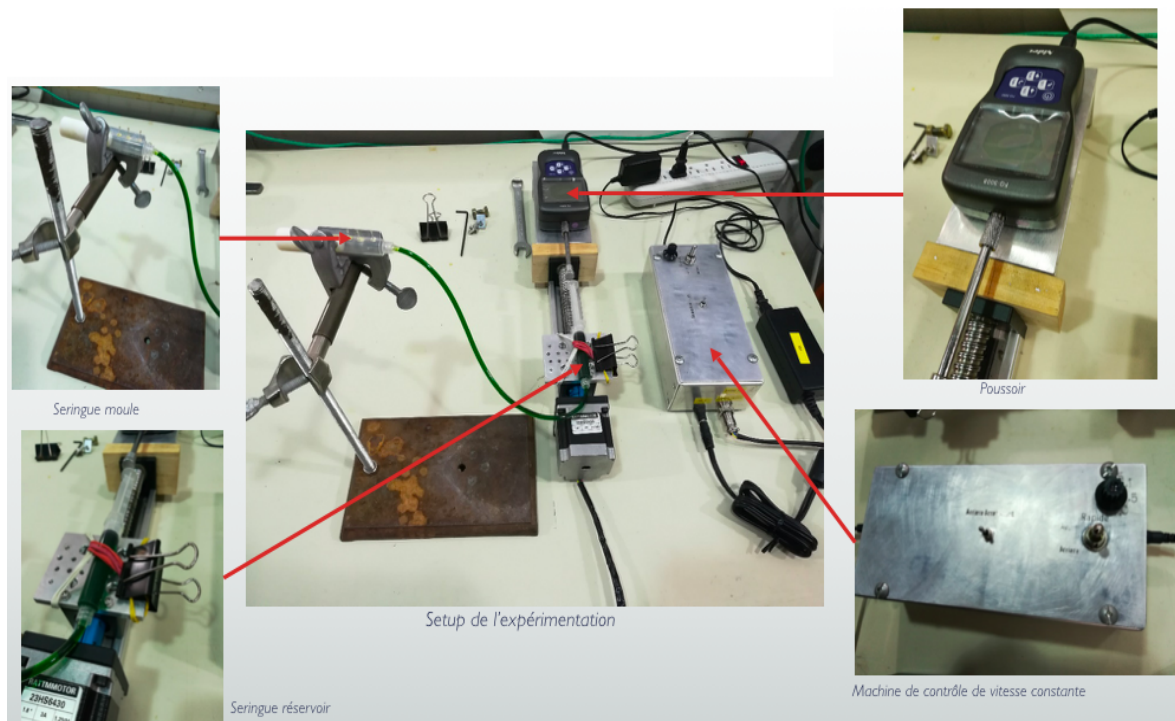


FIGURE 4.7 – Mise en place de l'expérimentation. En haut à gauche, nous avons la seringue utilisée comme moule, en bas à gauche la seringue contenant le fluide à l'instant $t=0$ s, en haut à droite la machine poussoir permettant d'injecter le fluide à vitesse constante dans la seringue moule, et en bas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

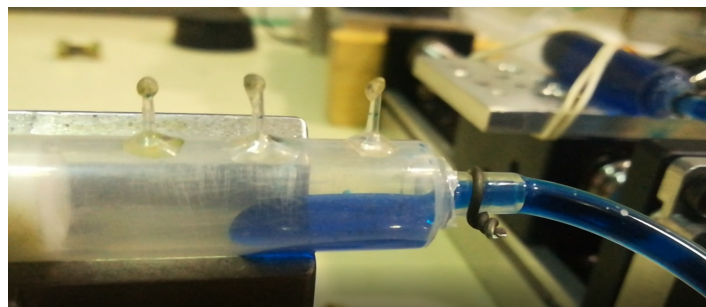


FIGURE 4.8 – Capture d'écran d'une vidéo de l'expérimentation

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.

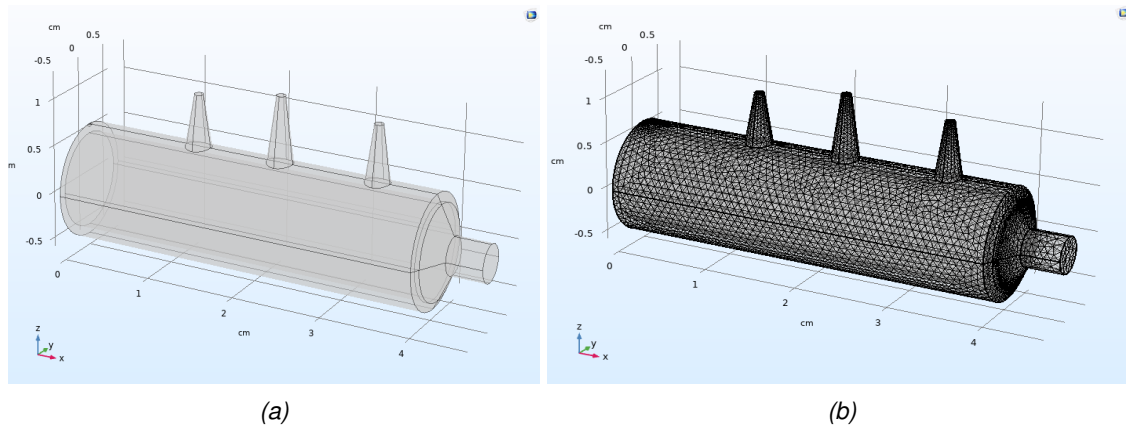


FIGURE 4.9 – Mise en place du modèle pour l'expérimentation. (a) : Géométrie de l'expérimentation sur COMSOL. (b) : Maillage de la géométrie COMSOL de l'expérimentation.

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.

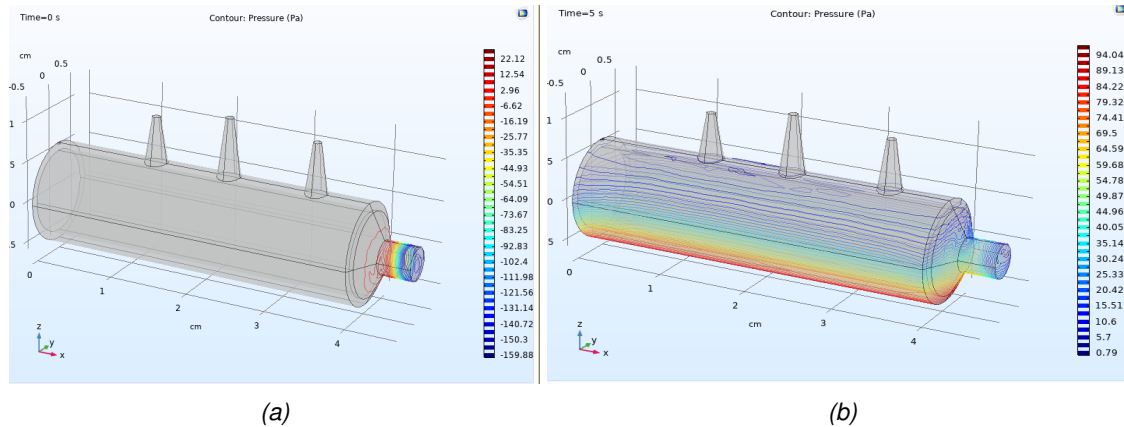


FIGURE 4.10 – Pression au sein de la cavité pour l'expérimentation. (a) : Pression dans la cavité à $t = 0$ s. (b) : Pression dans la cavité à $t = 5$ s.

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.

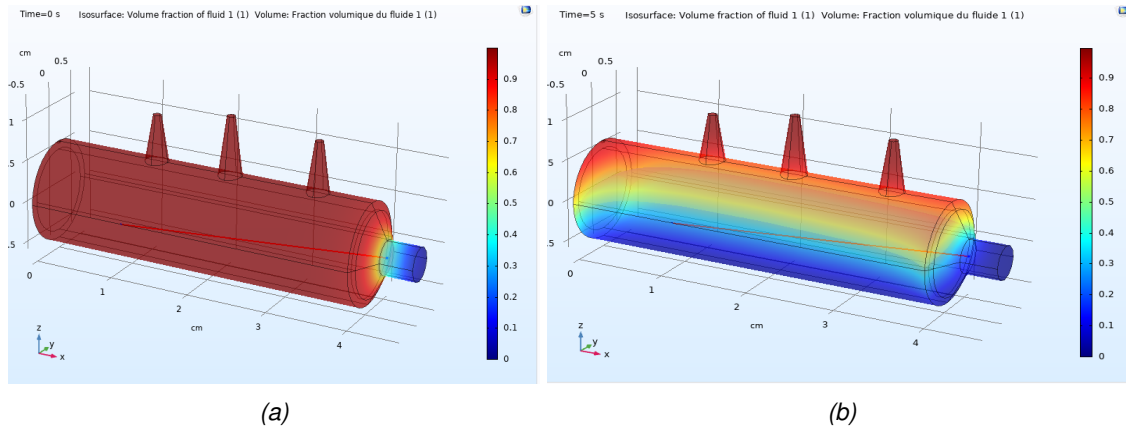


FIGURE 4.11 – Fraction volumique de fluide au sein de la cavité pour l'expérimentation. Fraction volumique de fluide dans la cavité à $t = 0$ s. (b) : Fraction volumique de fluide dans la cavité à $t = 5$ s.

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.

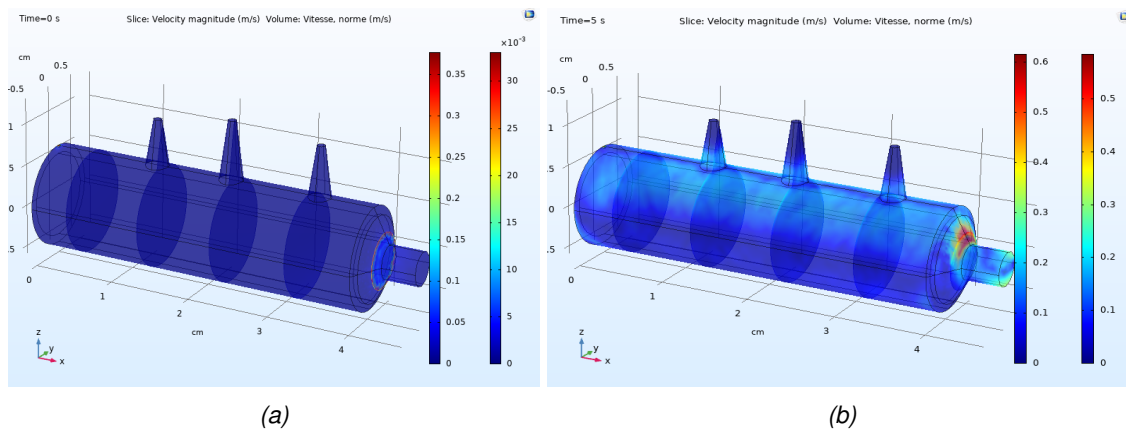


FIGURE 4.12 – Vitesse au sein de la cavité pour l'expérimentation. (a) : Vitesse dans la cavité à $t = 0$ s. (b) : Vitesse dans la cavité à $t = 5$ s

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.

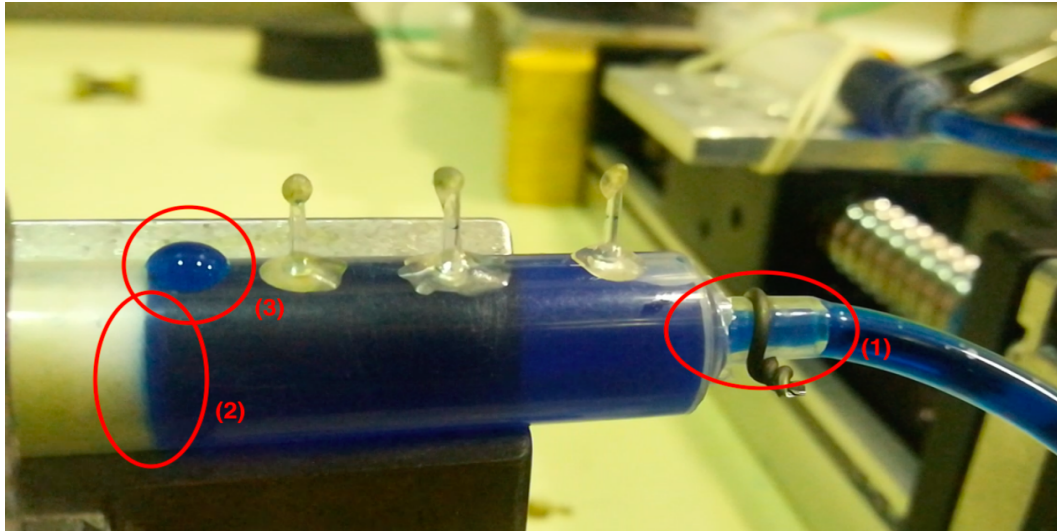


FIGURE 4.13 – Problèmes d'évacuation d'eau et d'air dans l'expérimentation effectuée.

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).

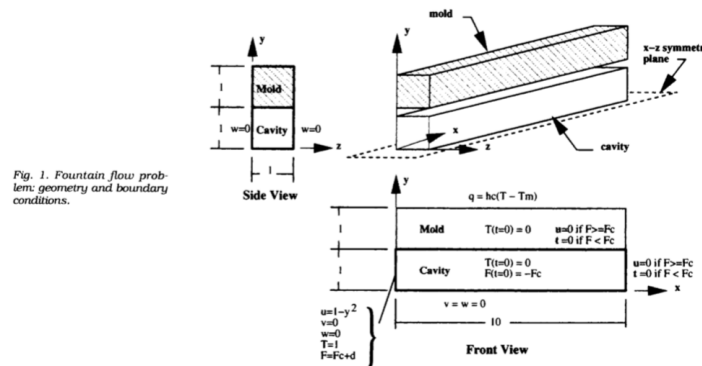


FIGURE 4.14 – Géométrie et donnée de l'article de J.F. Héту et al. [53]. Leur géométrie consiste en une simple cavité de moule rectangulaire simulée en deux dimensions.

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. Héту, 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. Héту, 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.

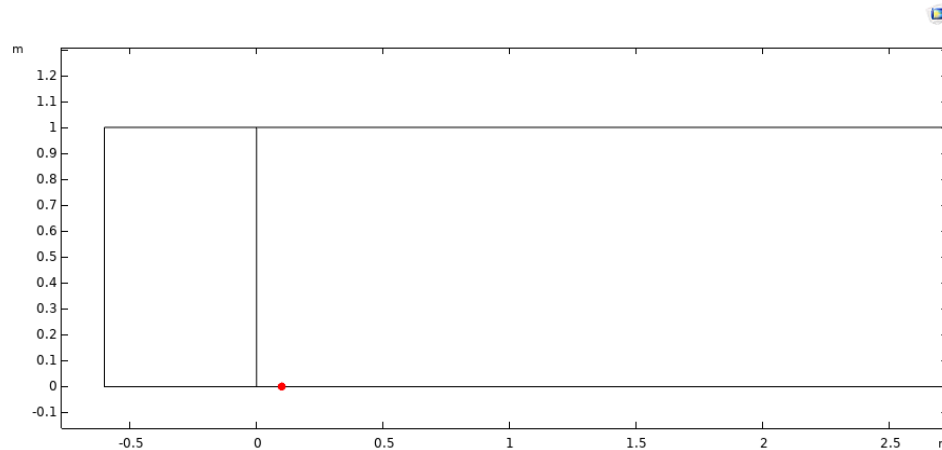


FIGURE 4.16 – Point de coupe pour le cas test.

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 :

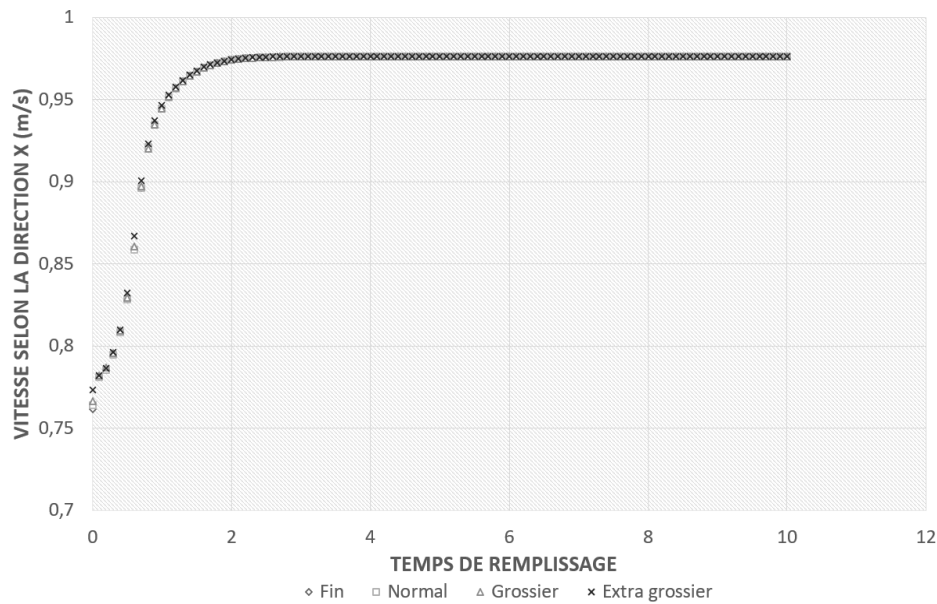


FIGURE 4.17 – Comparaison des vitesses obtenues avec chaque maillage dans COMSOL 5.4[®]. Les vitesses obtenues ont été testées pour les maillages Fin, Normal, Grossier et Très Grossier sur COMSOL Multiphysics 5.4[®]

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.

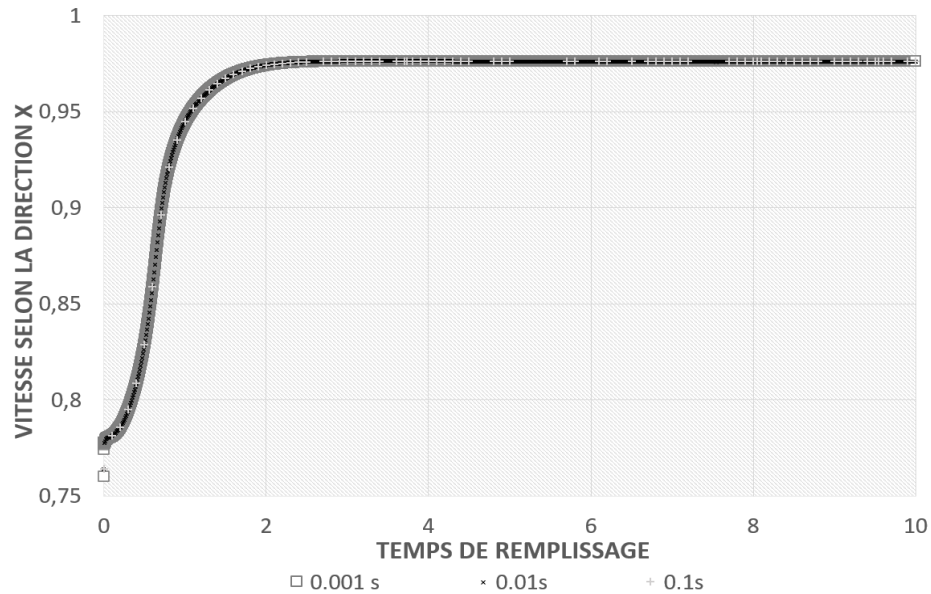


FIGURE 4.18 – Comparaison des vitesses obtenues avec chaque pas de temps dans COMSOL 5.4®. les pas de temps testés sont : 0,001 s, 0,01 s et 0,1 s.

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.

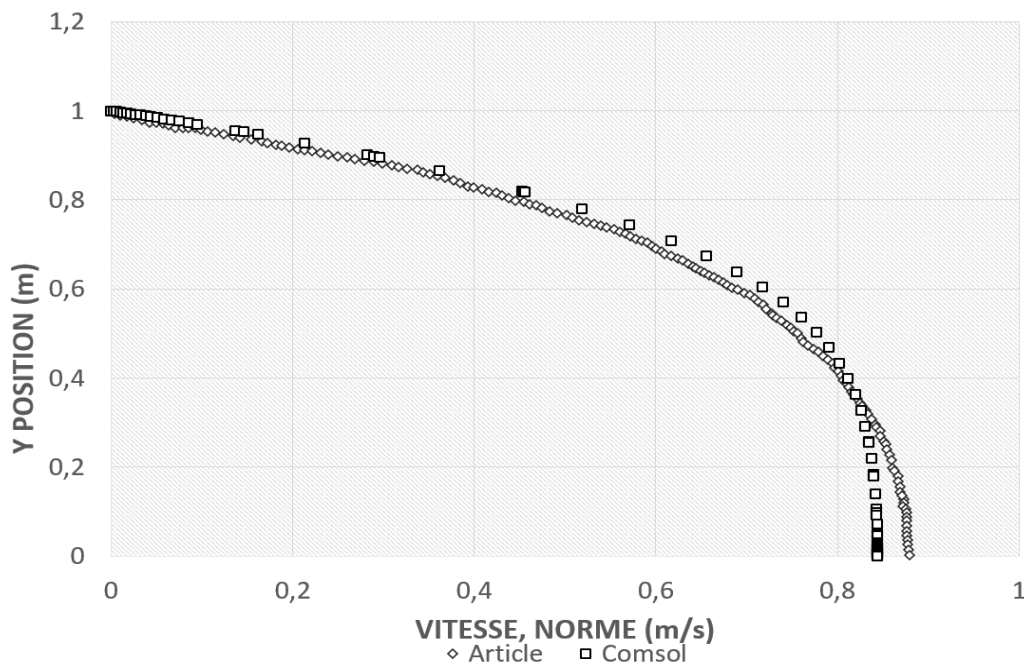


FIGURE 4.19 – Comparaison des courbes de vitesse obtenues entre COMSOL et l'article de J.F. Héty et al. □ : Résultats de vitesse obtenus à l'issue de notre simulation. ◇ : Données de vitesses fournies dans l'article.

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.

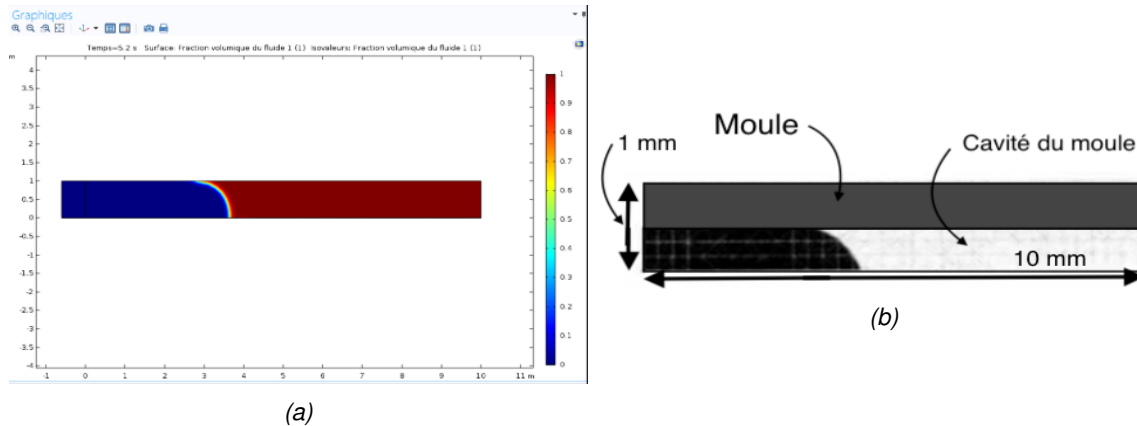


FIGURE 4.20 – Comparaison des fractions volumique entre l'article et la simulation COMSOL. (a) : Fraction volumique de fluide de la simulation. (b) : Fraction volumique de fluide dans l'article [53].

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[®] a consisté à suivre les modèles développés à l'aide des différents articles et de la littérature sur COMSOL 5.4[®] [85].

Après lecture et sélection des modèles mathématiques et des méthodes les plus adaptées à notre projet, la simulation avec COMSOL Multiphysics 5.4[®] 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[®], 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[®] est une géométrie purement 2D. La partie simulée dans un premier temps avec COMSOL Multiphysics[®] 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[®].

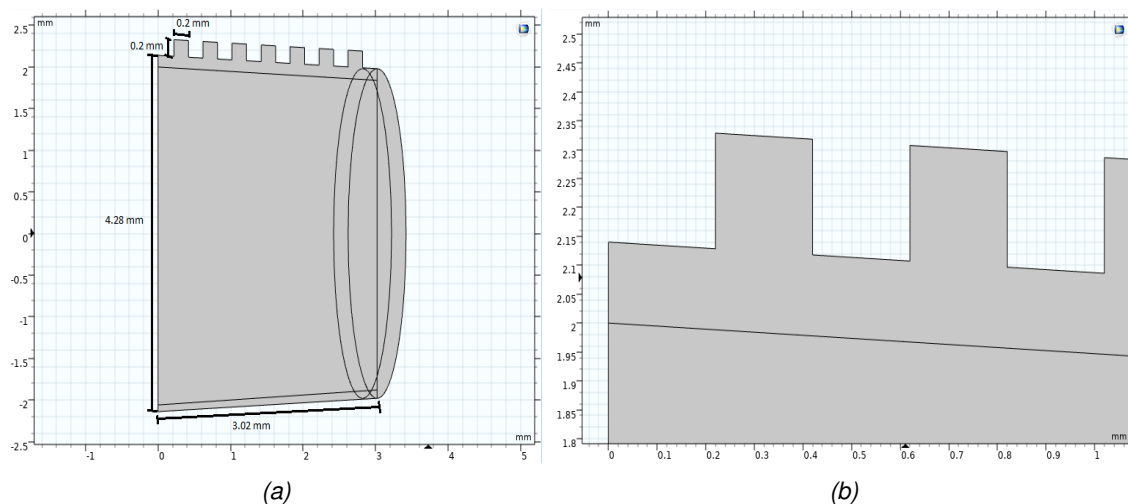


FIGURE 4.21 – Géométrie avec microtextures sur COMSOL 5.4[®]. (a) : Géométrie sur COMSOL 5.4[®]. (b) : Aspect des microtextures de 0,2 mm

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 :

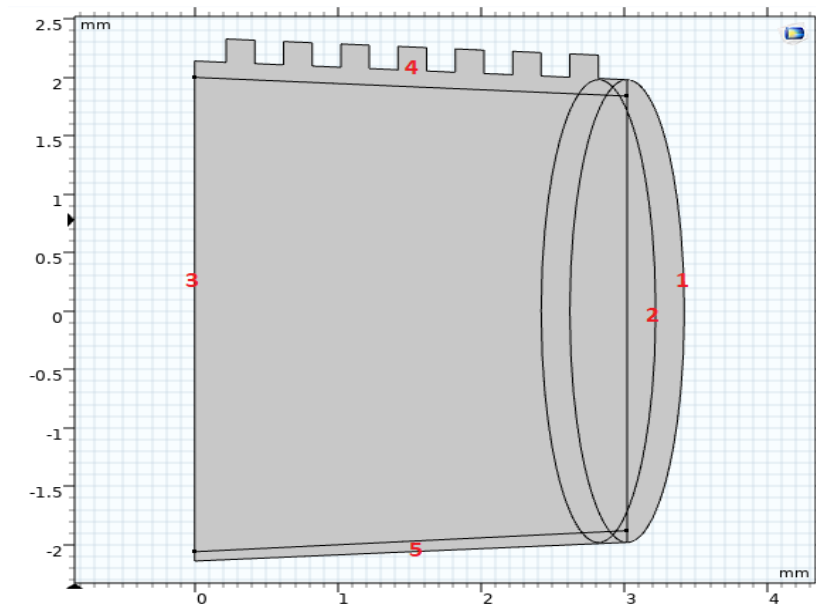


FIGURE 4.22 – Conditions appliquées aux frontières de la partie de l'isolateur simulée avec COMSOL Multiphysics 5.4®

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 ϕ 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[®] 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[®] :

- 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[®] et Autodesk Moldflow[®].

- 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 ($425,15\text{ K}$). 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 therm durcissables, ceux sélectionnés pour simuler numériquement le moulage à injection de polymère sont :

- l'air, matériau pris dans la bibliothèque COMSOL Multiphysics 5.4[®] 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[®] 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[®]. 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 : $\alpha_{iso} = 280e^{-6} K^{-1}$
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® 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.

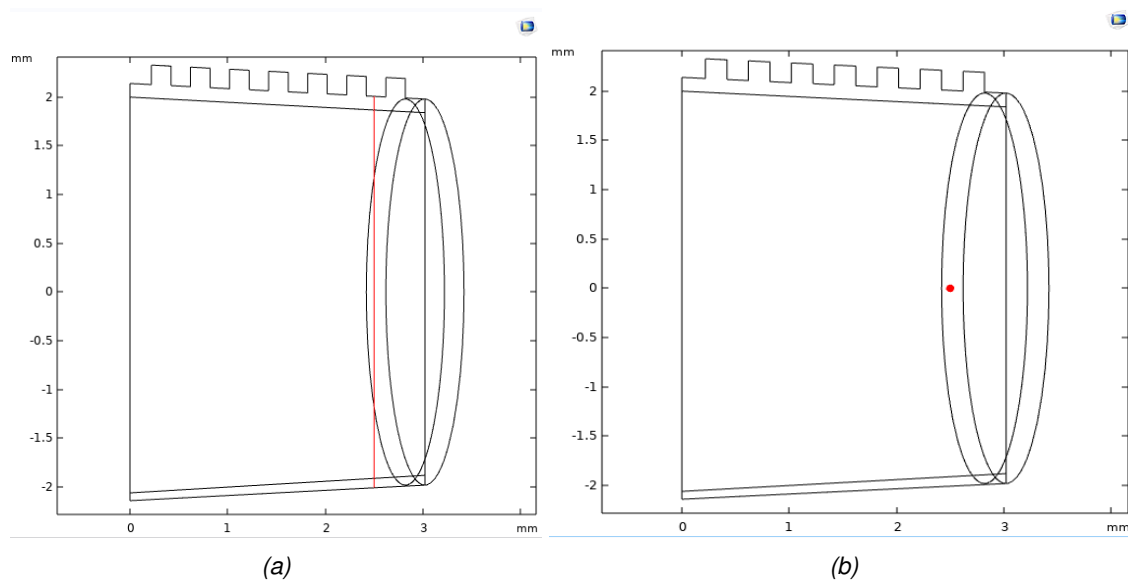


FIGURE 4.23 – Ligne et point de coupe où l'on récupère les profils et valeurs de vitesse. (a) : Ligne de coupe. (b) : Point de coupe.

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[®] 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 :

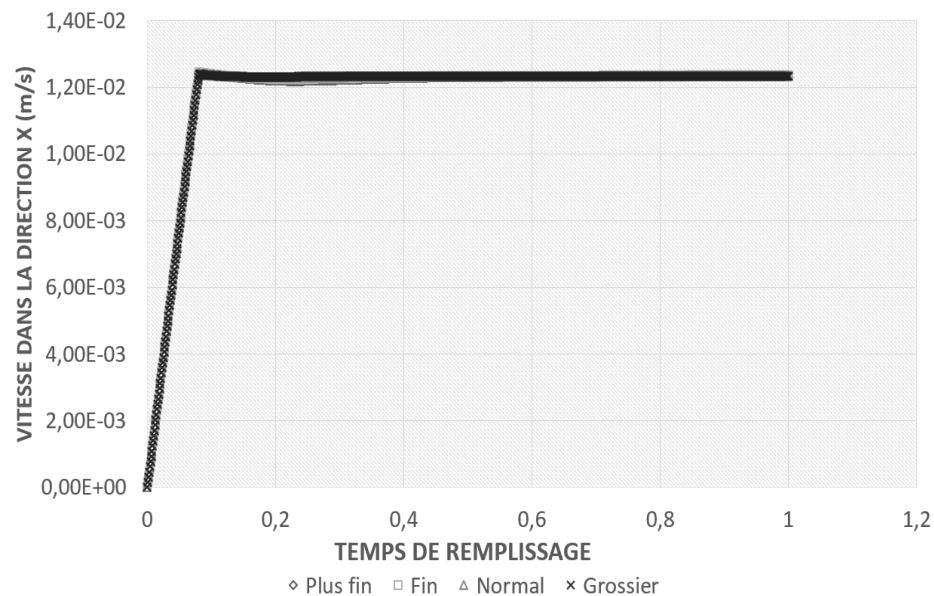


FIGURE 4.24 – Comparaison des vitesses obtenues avec chaque maillage dans COMSOL 5.4[®] au point de coupe présenté en figure 4.23b.

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 :

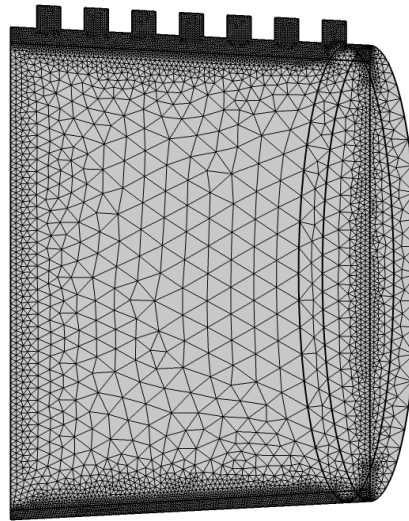


FIGURE 4.25 – Maillage fin raffiné aux parois de notre géométrie.

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 :

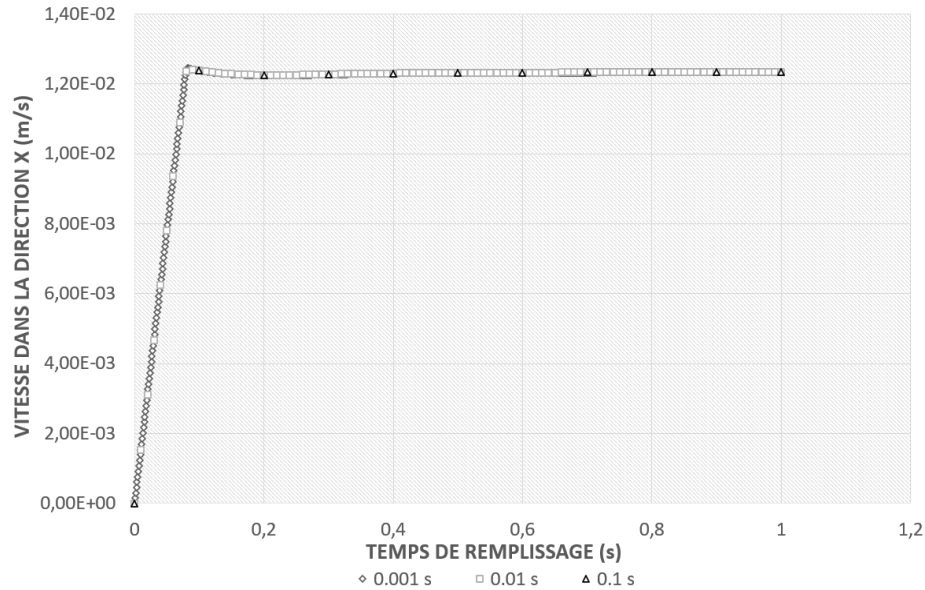


FIGURE 4.26 – Comparaison des vitesses obtenues avec chaque pas de temps dans COMSOL 5.4®. Les pas de temps testés sont les pas de temps 0,001 s, 0,01 s et 0,1 s.

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® 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® 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[®] :

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

Ces équations COMSOL Multiphysics 5.4[®] 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 γ et celui permettant de contrôler l'épaisseur de la surface ϵ sont les paramètres par défaut de COMSOL 5.4[®].

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 m.s^{-1} (en bleu) à $12.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ (en rouge).

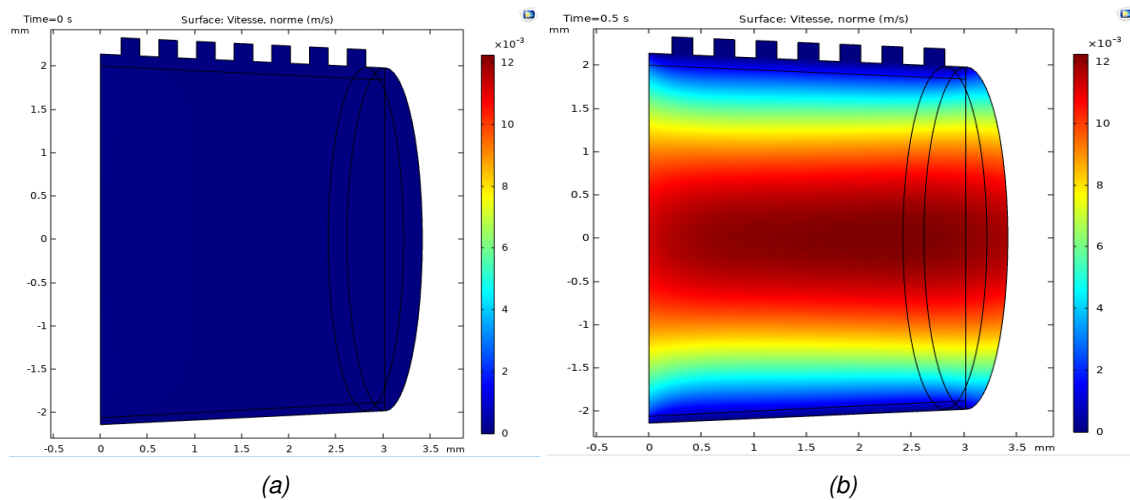


FIGURE 4.27 – Évolution de la vitesse du fluide au sein du moule entre $t=0$ s et $t=0,5$ s. (a) : Vitesse du fluide à $t=0$ s. (b) : Vitesse du fluide à $t=0,5$ s

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 $12.10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ 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 $0,008 \text{ m.s}^{-1}$), 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.

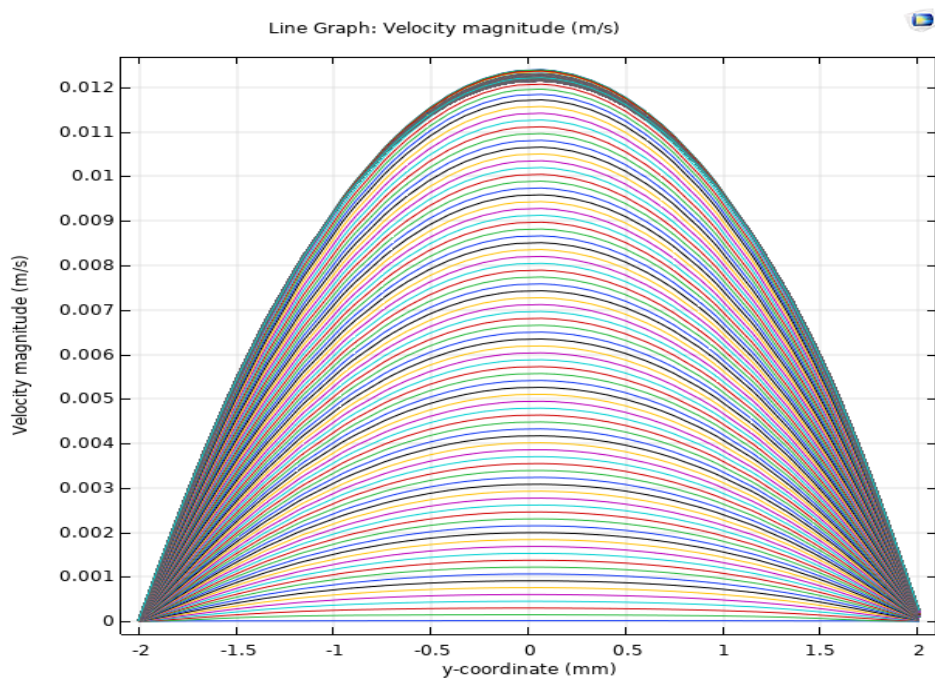


FIGURE 4.28 – Graphe de la norme des vitesses obtenues avec COMSOL 5.4® à la ligne de coupe présentée en figure 4.23a pour chaque pas de temps. Comme précisé plus haut, le pas de temps choisi est à $0,001s$ pour une durée de remplissage de $0,5s$

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.

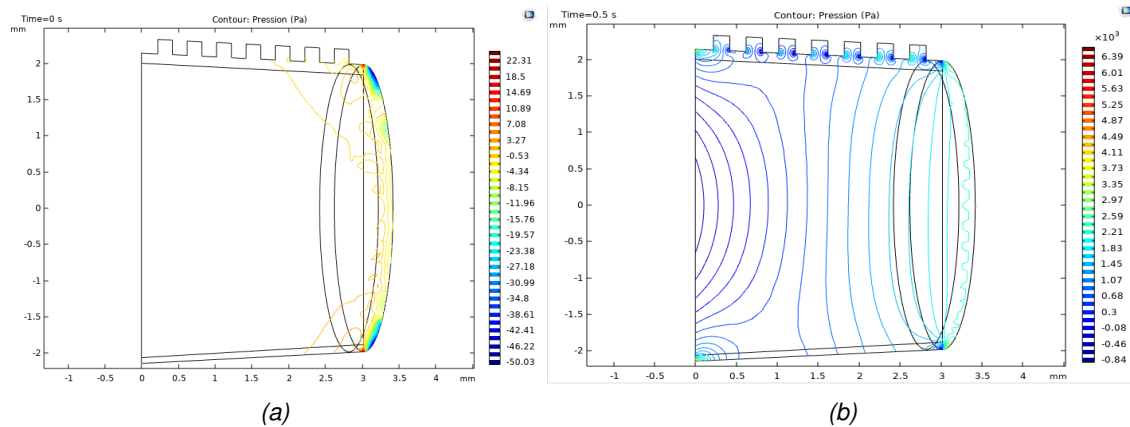


FIGURE 4.29 – Évolution du gradient de pression dans la cavité lors de l'injection. (a) : Pression dans la cavité à $t=0$ s. (b) : Pression dans la cavité à $t=0,5$ s

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 renvoie 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.

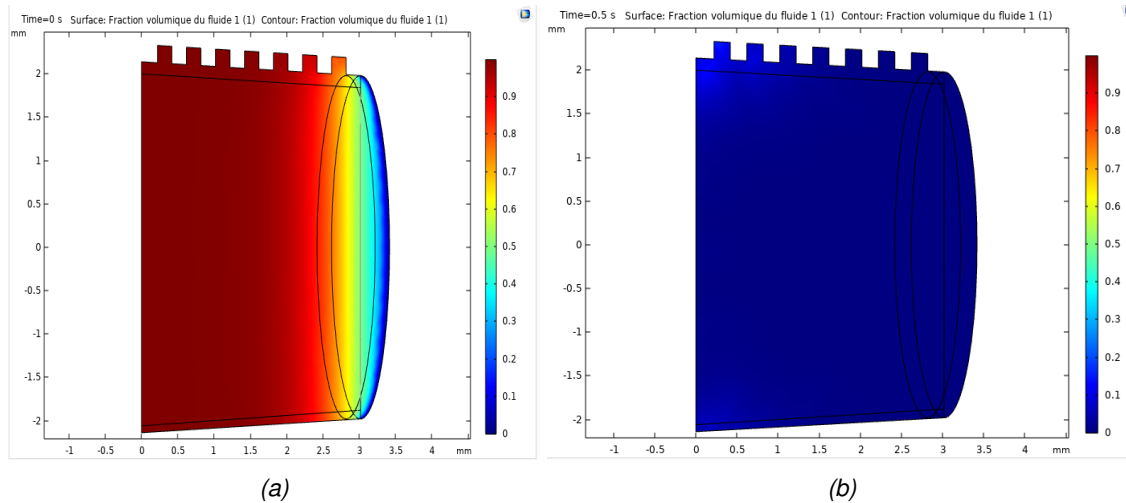


FIGURE 4.30 – Évolution de la fraction volumique de fluide entre l’instant initial $t=0$ s et le remplissage de la cavité simulée à $t=0,5$ s. (a) : Fraction volumique de fluide à $t=0$ s. (b) Fraction volumique de fluide à $t=0,5$ s

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 ($u_{inlet} = 0.008 \text{ m.s}^{-1}$). 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 $0,008 \text{ m.s}^{-1}$.

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.

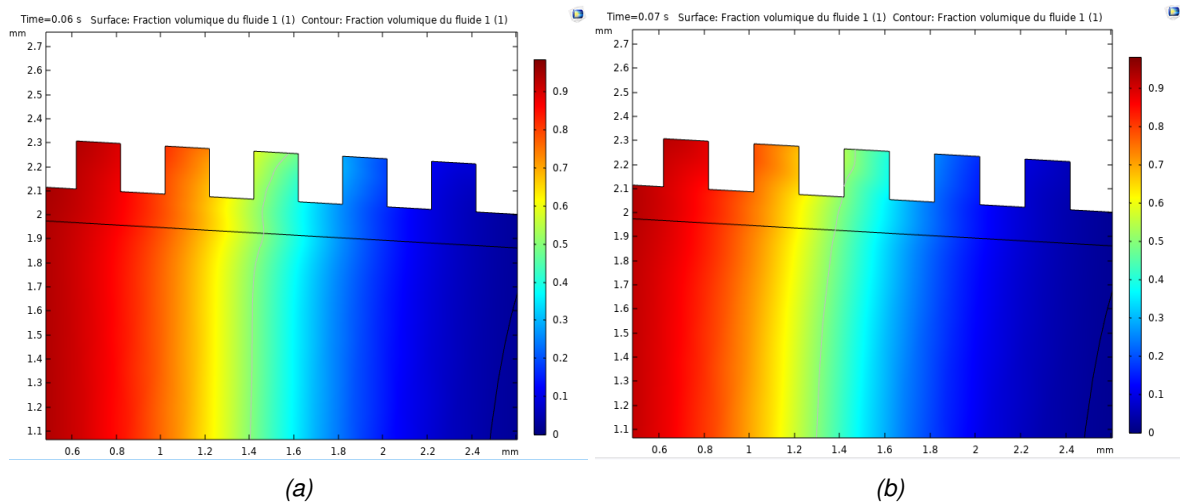


FIGURE 4.31 – Observation du front d'écoulement (ligne grisée) et évolution de ce dernier dans les microtextures de 0.2mm de la géométrie simulée. (a) : Évolution du fluide dans les textures à $t=0,06$ s. (b) : Évolution du fluide dans les textures à $t=0,07$ s.

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 mm.s^{-1}
Vitesse d'injection 2	8 mm.s^{-1}
Vitesse d'injection 3	10 mm.s^{-1}
Vitesse d'injection 4	15 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.

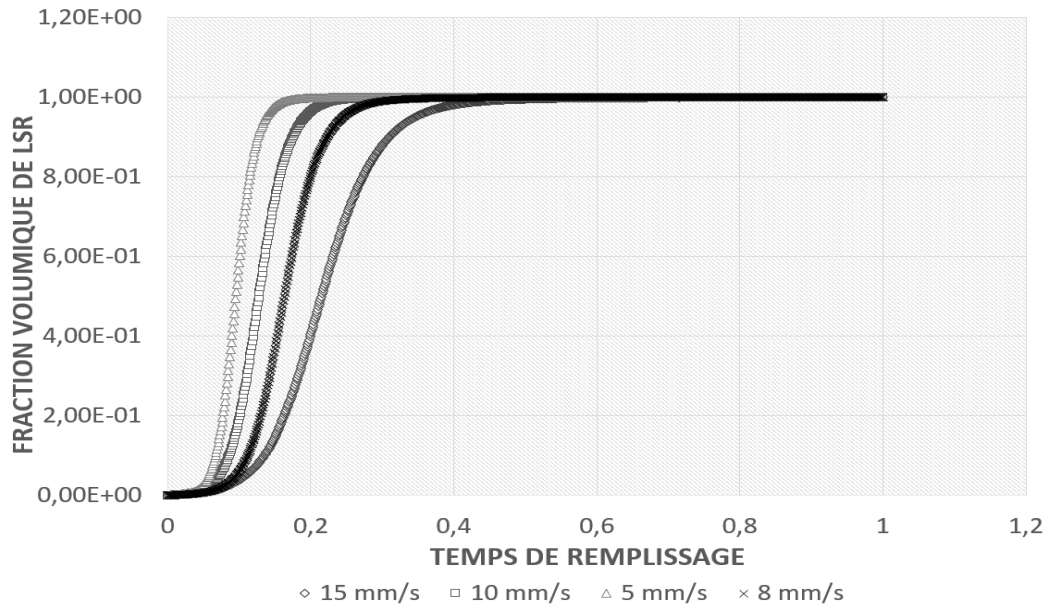


FIGURE 4.32 – Comparaison des fractions volumique de LSR en fonction des vitesses d'injection®. Les vitesses testées ici sont : 5 mm/s, 8 mm/s, 10 mm/s et 15 mm/s.

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 réplcation 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 :

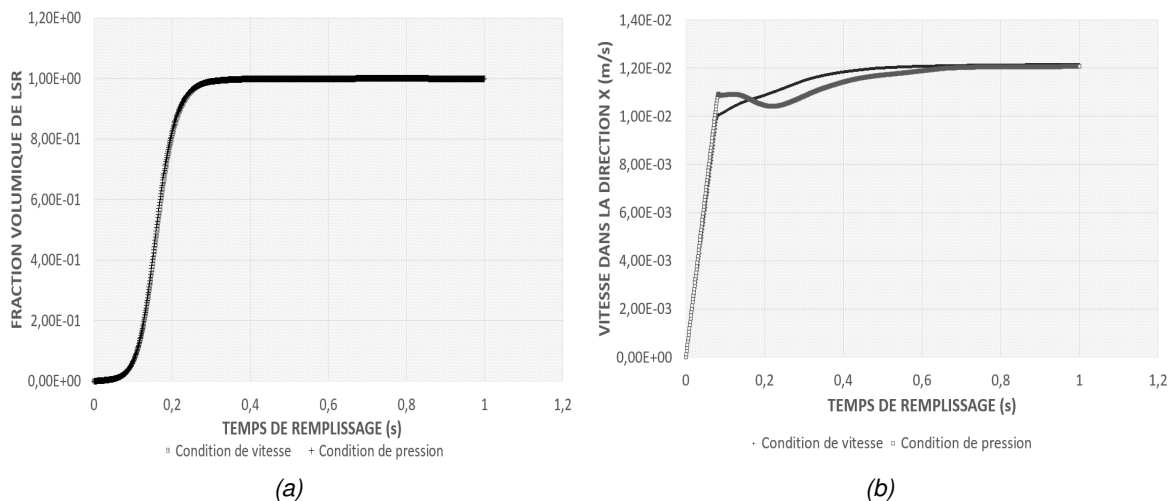


FIGURE 4.33 – Comparaison des résultats obtenus lorsque l'on modifie les conditions d'entrée. (a) : Comparaison des courbes de fraction volumique en fonction des conditions d'entrée de vitesse et de pression. (b) : Comparaison des courbes de vitesse en fonction des conditions d'entrée de vitesse et de 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°C (Température ambiante)
Température du polymère : 20°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.

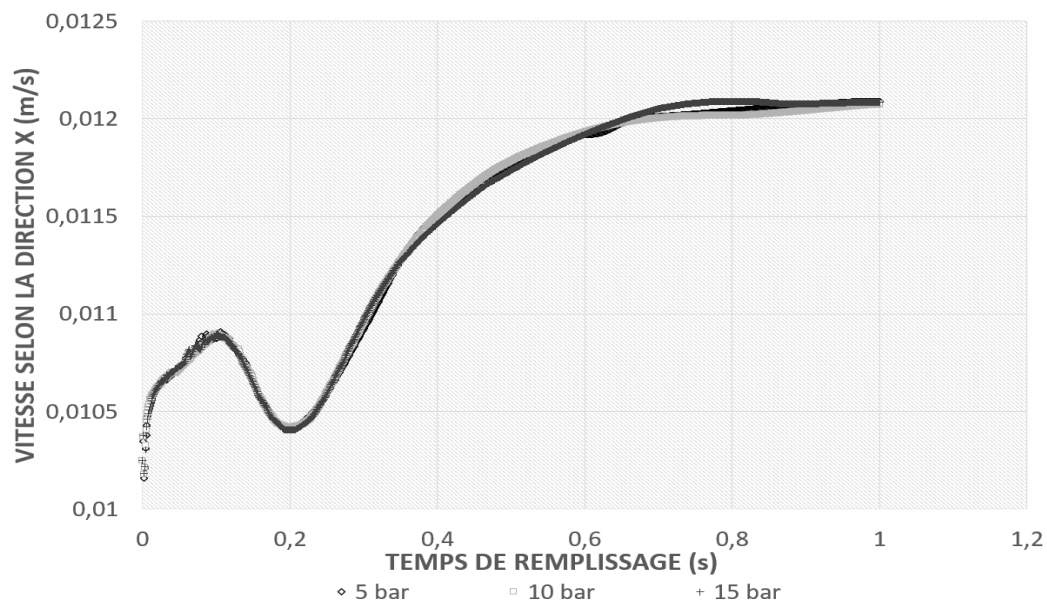


FIGURE 4.34 – Comparaison des fractions volumique de LSR en fonction du temps de remplissage®

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[®], 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® 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

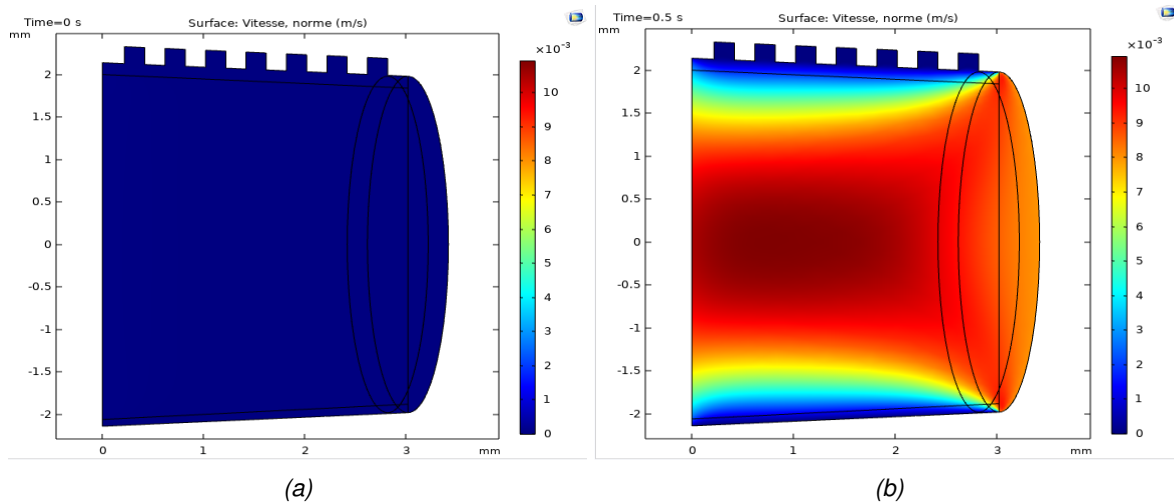


FIGURE 4.35 – Vitesse du fluide dans le moule pour la simulation thermique. (a) : Vitesse du fluide à $t=0$ s. (b) : Vitesse du fluide à $t=0,5$ s

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 :

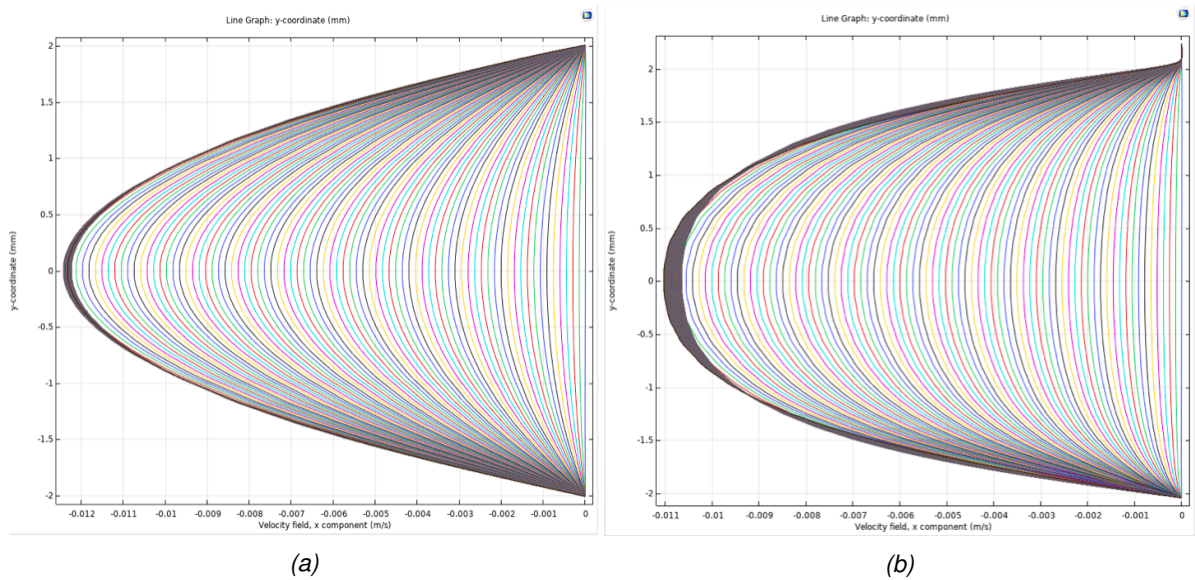


FIGURE 4.36 – Comparaison des profil de vitesse dans les simulations isotherme et thermiques. (a) : Vitesse du fluide dans la simulation isotherme. (b) : Vitesse du fluide dans la simulation thermique.

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.

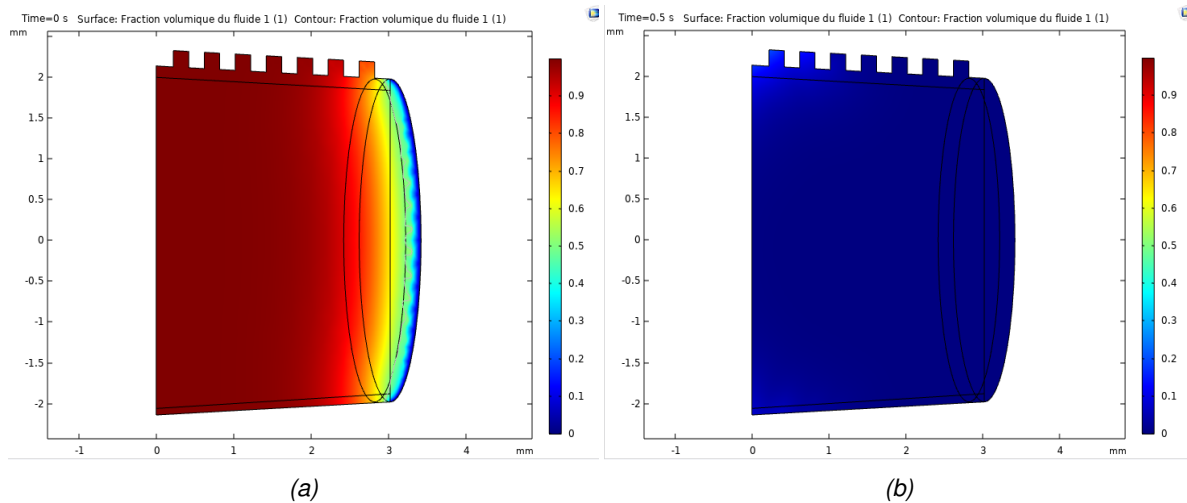


FIGURE 4.37 – Évolution de la fraction volumique de fluide dans la simulation thermique. (a) : Fraction volumique de fluide à $t=0$ s. (b) : Fraction volumique de fluide à $t=0,5$ s.

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.

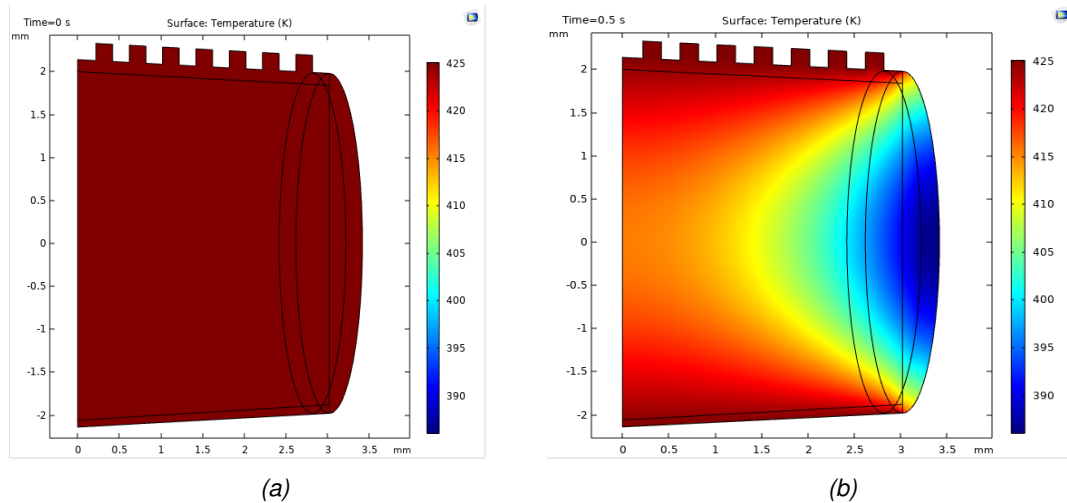


FIGURE 4.38 – Évolution de la température dans le moule. (a) : Température dans le moule à $t=0$ s. (b) : Température dans le moule à $t=0,5$ s

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°C) et plus hautes (172°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°C
Température du moule 2	152°C
Température du moule 3	172°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.

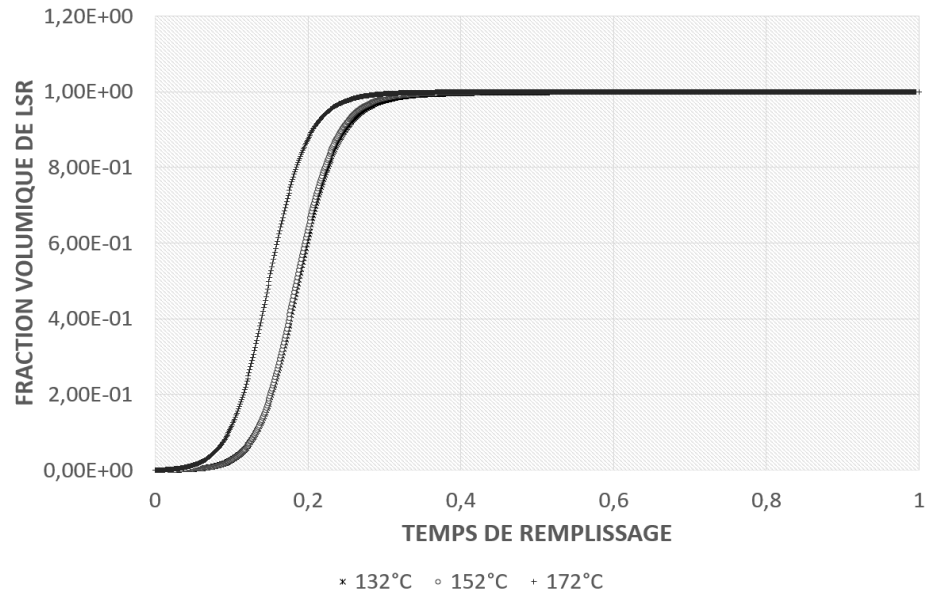


FIGURE 4.39 – Comparaison des fractions volumique de LSR en fonction des températures du moule

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.

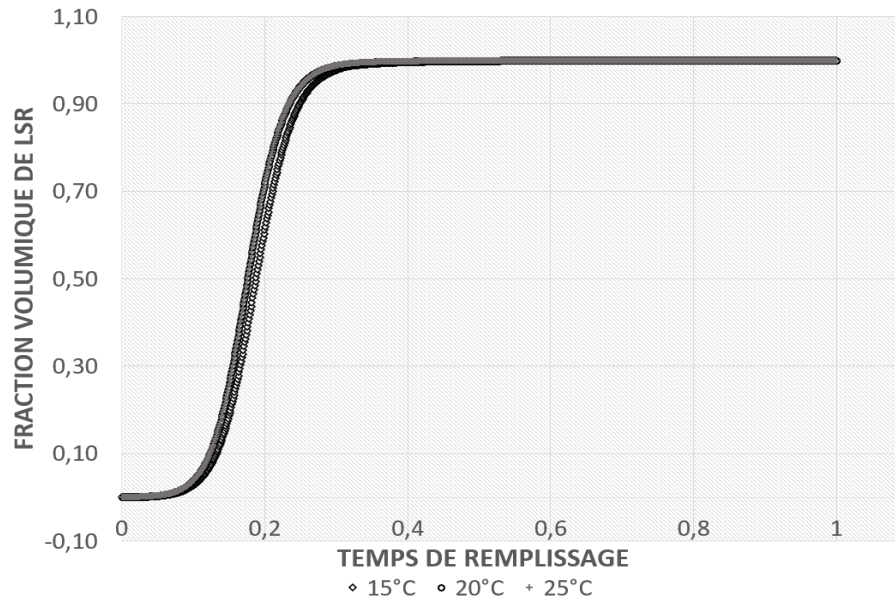


FIGURE 4.40 – Comparaison des fractions volumique de LSR en fonction des températures du polymère

4.3.2.3 Remplissage des micro-textures avec COMSOL

Enfin, le remplissage des textures avec la simulation COMSOL Multiphysics® 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.

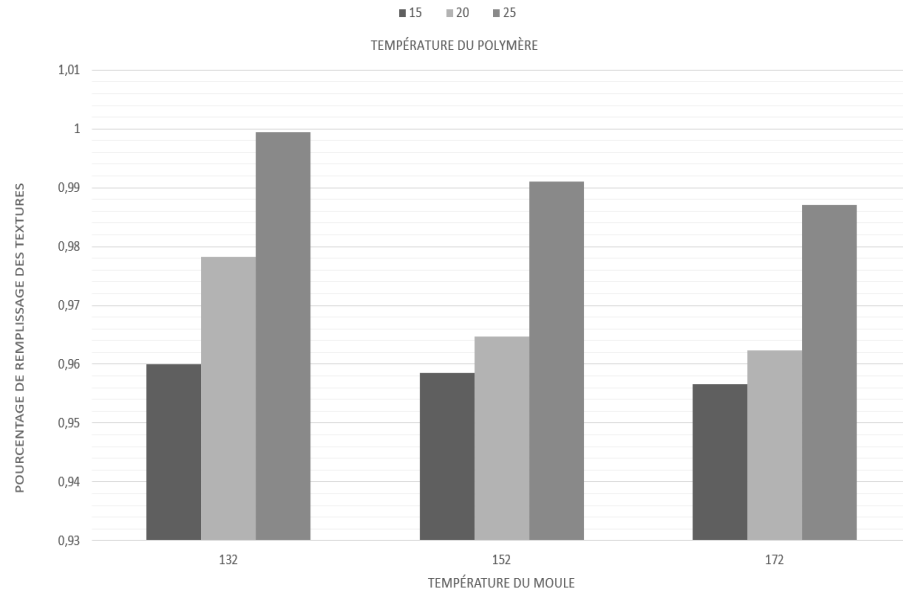


FIGURE 4.41 – Remplissage des textures dans la simulation COMSOL Multiphysics en fonction des températures de moule et de polymère.

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.

Chapitre 5

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

5.1 Conclusions

Ce projet consistait donc à mettre en place une simulation numérique du moulage à injection d'un isolateur composé de micro-textures afin de comprendre le phénomène du remplissage de ce dernier. Nous avons donc dans ce projet déterminer les équations les plus adéquats pour le moulage à injection de surface micro-texturées, notamment grâce à la revue de littérature. Nous avons également pu observer dans une certaine mesure l'effet de la variation des paramètres clés du moulage à injection. Ces différentes simulations nous ont permis de mettre en évidence que :

— Pour le temps de remplissage :

- Pour Moldflow[®], la température du moule influence le temps de remplissage. En effet, plus la température du moule est importante, plus le remplissage est rapide.
- Ce résultat a pu être confirmé avec la simulation thermique de COMSOL, qui

montre une distribution des vitesses plus importante que pour les simulations isothermes

- Cependant, il semble que le temps de remplissage total de Moldflow semble plus rapide qu'avec COMSOL® : environ 20 s pour Moldflow, et plutôt 40 s pour COMSOL®. Cela pourrait être lié au fait que la vitesse n'est pas fixée par l'utilisateur dans Moldflow, mais par le logiciel.

— Pour la pression interne :

- Pour Moldflow®, nous avons pu observer que la température du polymère influe sur la pression interne. En effet, lorsque la température du polymère baisse, nous constatons que la pression interne augmente.

- Nous observons que dans COMSOL®, la pression interne dans la cavité est plus importante dans la simulation isotherme que dans la simulation thermique, ce qui corrobore les résultats que nous avons obtenus avec Moldflow.

— Pour l'évolution de la température :

- Nous observons dans Moldflow® que l'évolution de la température est assez progressive

- Cependant dans COMSOL®, la distribution de température est beaucoup plus rapide. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la simulation en température de COMSOL peut encore être améliorée.

Ces simulations nous permettent donc de mettre en évidence plusieurs choses avec ces logiciels :

Le logiciel Moldflow Insight Ultimate® présente des résultats variés et très intéressants, et il a également une grande bibliothèque de matériau. Cependant, il est très spécifique au moulage à injection, et il est difficile de le maîtriser ou de modifier les différents paramètres

de notre problème. Il demande aussi une grande puissance de calcul et ses capacités n'ont pas pu être explorées avec des textures en dessous de 0.5 mm.

COMSOL Multiphysics 5.4[®] est quant à lui plus simple à utiliser, car les paramètres définis sont plus faciles à personnaliser et il est possible d'ajouter les équations ou les physiques nécessaires à notre problème. De plus, COMSOL a été plus aisé à utiliser avec des micro-textures de taille inférieure à 0,5 mm, et donc à simuler des surfaces micro-texturées. Cependant, il est important de pleinement maîtriser le modèle physique que nous souhaitons simuler avec COMSOL[®], car ce dernier peut fournir des résultats faussés s'ils ne sont pas vérifiés.

Ainsi dans ce projet, nous avons pu effectuer la simulation numérique d'une surface avec des micro-textures rectangulaires simples de taille égale à 0,2 mm. Nous avons pu constater que les logiciels que nous avons utilisé sont adaptés à notre projet, mais ils demandent chacun une puissance de calcul supérieure à celle disponible. De plus, les simulations effectuées sont améliorables pour les futurs travaux sur ce sujet. L'utilisation de Moldflow Insight[®] en 3D et de COMSOL Multiphysics[®] en 2D empêche également une comparaison approfondie des résultats fournis par les deux logiciels. L'ajout de la troisième dimension dans Moldflow Insight[®] influe sûrement sur les résultats obtenus et ne permet donc pas de comparer avec certitude les résultats obtenus avec COMSOL Multiphysics[®]. En effet, il serait éventuellement possible de comparer les résultats 3D d'un logiciel avec des résultats en 2D, comme l'ont fait Misha et al. [91] dans leur article. Cependant, des conditions doivent être remplies afin de confirmer la validité de la comparaison : dans leur article de 2014, Misha et al. [91] ont choisi une géométrie 2D ayant les mêmes conditions initiales, conditions aux frontières et forme que leur géométrie 3D. Ceci leur permet de comparer les résultats de leurs géométries 2D et 3D et d'être certain de ne pas avoir d'incohérences dans leurs résultats.

Dans notre projet, la porte d'injection de polymère est représentée par un point d'entrée unique sur le bord de l'isolateur. La géométrie de notre projet ne permet donc pas d'obtenir un point de coupe qui nous donne les mêmes conditions initiales, conditions aux frontières et formes pour les géométries 2D et 3D, il n'est donc pas possible à ce niveau de faire des comparaisons entre les deux logiciels.

La simulation numérique du moulage à injection de polymères est donc possible et permet d'obtenir de nombreuses informations intéressantes sur l'état final d'un moule avant de se lancer dans l'injection d'un prototype réel. En effet, les informations comme le temps de remplissage, la pression interne à la cavité ainsi que l'évolution de la température au sein de celle-ci sont d'autant plus importantes qu'elles peuvent aider à prévenir les éventuels défauts de fabrication et échec d'injection avant même de les créer.

5.2 Recommandations

Ce projet présente de nombreuses voies de progrès et d'amélioration. En effet, les résultats obtenus sont intéressants, mais se concentrent sur les premiers instants de remplissage du moule. Il y aurait plusieurs pistes à explorer si nous voulons poursuivre dans ce projet de recherche :

- Tout d'abord, les différents modèles utilisés dans ce projet sont très intéressants pour la simulation du moulage à injection, mais ils ont été choisis en fonction des moyens mis à disposition et des ressources disponibles. Certains modèles comme celui des champs de phase pourrait permettre de visualiser avec plus de précision l'évolution du front d'écoulement, mais cette méthode demande beaucoup trop de ressources numériques pour être mise en place aisément. Avec les moyens nécessaires, il serait cependant intéressant de tester la méthode des champs de phase et de voir la

- différence obtenue avec les résultats donnés par la méthode des surfaces de niveau ;
- Le matériau utilisé pour ce projet est un élastomère de silicone liquide, qui présente des caractéristiques semblables au matériau qui a été initialement prévu pour ce projet, l'élastomère de silicone HTV (High Temperature Vulcanized silicon rubber). Ce matériau a une viscosité beaucoup plus grande que le LSR et présente un défi plus important à relever ;
 - La taille des micro-textures utilisées dans ce projet a été sélectionnée en fonction des tolérances de chaque logiciels à ces dernières. La limite de taille de textures de $200\mu m$ rentre bien dans le domaine microscopique, selon plusieurs articles, cependant, cette taille de textures n'est pas suffisante pour obtenir une surface superhydrophobe. La diminution de la taille des textures serait donc un autre défi qu'il est possible de relever avec les logiciels et la puissance de calcul nécessaire ;
 - La possibilité de faire la liaison entre les logiciels Moldflow Insight® et COMSOL® permettrait de mieux contrôler les conditions aux limites de ce dernier logiciel. En effet, dans certains articles des groupes de recherche ont développé des codes informatiques permettant de récupérer les données fournies par Moldflow Insight® afin de les réutiliser comme conditions aux limites dans le logiciel COMSOL Multiphysics® ;
 - Afin d'obtenir une simulation Moldflow® encore plus proche du processus de l'entreprise K-Line insulator Co., il serait intéressant de pouvoir récupérer les informations complètes sur les paramètres utilisés ainsi que sur le matériau que souhaite utiliser l'entreprise ;
 - L'agrandissement de la géométrie 2D de notre projet, voire la représentation 3D de ce dernier serait aussi un défi à relever. En effet, le remplissage du moule n'est pas le même en fonction de là où l'on se trouve dans celui-ci. Cela pourrait nous fournir

des informations intéressantes sur le comportement du fluide en tout point du moule, ou encore permettre une comparaison entre Moldflow et COMSOL.

- Lors des simulations effectuées avec Moldflow, plusieurs portes d'injection ont été testées dans un premier temps. Cependant, dans une optique de pouvoir comparer les deux logiciels dans le futur, les simulations finales ont été faites avec une seule porte d'injection située à l'extrémité de la jupe de l'isolateur. Il serait intéressant d'observer le phénomène de remplissage du moule lorsque l'on déplace la porte d'injection du matériau, ou même si l'on ajoute d'autres portes d'injection au moule.
- Enfin, à l'issue de l'ensemble des simulations effectuées sur cette géométrie de l'isolateur, il pourrait être intéressant de considérer la création d'un prototype à partir des informations recueillies par les logiciels. La possibilité de la réussite rapide de la création du prototype sera un point favorable permettant de confirmer à nouveau la place importante de la simulation numérique dans l'économie de matériel lors de la création de prototype.

Ce projet de recherche a pu poser des bases pour l'exploration de ces défis dans les travaux à venir qui pourraient être réalisés dans le domaine de la superhydrophobicité pour des équipements électriques.

ANNEXES

Paramètres COMSOL Multiphysics

TABLE 5.1 – Paramètres sélectionnés pour les simulations COMSOL Multiphysics

Matériaux	Air	Matériau de la bibliothèque COMSOL
	LSR	Matériau créé par l'utilisateur (voir table 4.10)
Écoulement laminaire	Propriétés du fluide 1 (Air)	Sélection de l'ensemble de la géométrie
	Valeurs initiales	Champs de vitesse et pression nulle
	Paroi 1	Paroi mouillée
	Gravité 1	Constante de gravité $g = 9,8 \text{ m/s}$
	Entrée 1	Écoulement entièrement développé, Vitesse moyenne $u = 0,008 \text{ m/s}$
	Sortie 1	Pression $p = 0 \text{ Pa}$
Level set (ls)	Modèle level set 1	$\gamma = 1 \text{ m/s}$; $\epsilon = \text{ls.ep_default m}$
	Valeurs initiales 1	Air = Fluide ($\phi = 0$)
	Parois	Pas d'écoulement
	Interface initiale 1	Sélection de l'interface initiale Air/LSR
	Valeurs initiales 2	LSR = Fluide ($\phi = 1$)
	Entrée 1	LSR = Fluide ($\phi = 1$)
	Sortie	Sortie de l'écoulement laminaire
Multiphysique	Écoulement diphasique	Écoulement laminaire et level set
		Fluide 1 = Air, Fluide 2 = LSR
		Tension de surface $\sigma = 0,023 \text{ N/m}$
Maillage	Taille	Maillage grossier sur la géométrie
	Triangle libre 1	Raffinement au niveau de parois
	Triangle libre 2	Distribution au niveau des interfaces (entrée, interface initiale, sortie)
Étude	Étape 1	Initialisation de la phase
	Étape 2	Temporel (Pour les pas de temps sélectionnés, voir partie 4.3)

Bibliographie

- [1] Laura Neilson BONIKOWSKY et Nico BLOCK : Tempête de verglas de 1998. <https://thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/la-crise-du-verglas-1998>, 2016. 7 août 2020.
- [2] Nicolas LAFFONT : Il y a 20 ans, la crise du verglas. <http://www.45enord.ca/2018/01/il-y-a-20-ans-la-crise-du-verglas/>, 2018. Access-date : 2020-07.
- [3] K-Line Insulators LIMITED : K-line insulators story. <https://www.k-line.net/about>. Access-date : 2019-02.
- [4] Centre National de Ressources Textuelles et LEXICALES : Isolateur. <https://www.cnrtl.fr/definition/isolateur>, 2012. Access-date : 2018-12.
- [5] Ch. RABAH : *Détermination de la tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM*. Thèse de doctorat, 1996.
- [6] R. JAFARI et M. FARZANEH : Development a simple method to create the superhydrophobic composite coatings. *Journal of Composite Materials*, 47(25):3125–3129, 2012. Access-date : 2018-02.
- [7] Vincent RAIMBAULT : *Etude et développement d'un système microfluidique à ondes de Love dédié à la caractérisation de fluides complexes*. Theses, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, juin 2008. Access-date : 2018-03.
- [8] P. TABELING : *Introduction à la microfluidique*. Editions Belin, Paris, France, 2003. Access-date : 2018-05.
- [9] O. W. ESHBACH et M. KUTZ : *Eshbach's handbook of engineering fundamentals*. John Wiley and Sons, Inc., 2009. Access-date : 2018-03.
- [10] Y. A. ÇENGEL et J. M. CIMBALA : *Fluid mechanics : fundamentals and applications*. McGraw-Hill Higher Education, Boston, 2006. Access-date : 2019-04.
- [11] J. D. BRASSARD : *Revêtements nanostructurés superhydrophobes en vue d'applications en aérodynamique*. Mémoire de maîtrise, Chicoutimi, 2011. Access-date : 2019-02.
- [12] D. QUÉRÉ, J. BICO, D. RICHARD, P. AUSSILLOUS, A.-L. BIANCE, M. CALLIES, A. LA-FUMA, F. CHEVY, C. CLANET et K. OKUMURA : Les surfaces super-hydrophobes. page 5. Access-date : 2019-06.
- [13] R. RAS et A. MARMUR : *Non-wettable surface*. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 2017. Access-date : 2018-06.

- [14] S. MELKI : Etude du mouillage de structures fibreuses multi échelles : robustesse de l'hydrophobicité, 2014. Access-date : 2018-06.
- [15] H. Yildirim ERBIL et C. Elif CANSOY : Range of applicability of the wenzel and cassie-baxter equations for superhydrophobic surfaces. *Langmuir*, 25(24):14135–14145, 2009. Access-date : 2020-01.
- [16] José A. RAMOS HERNANZ, José J. CAMPAYO MARTÍN, Joseba MOTRICO GOGESCOE-CHEA et Inmaculada ZAMORA BELVER : Insulator pollution in transmission lines. *REPQJ*, Vol. 1(No.4), April 2006. Access-date : 2020-08.
- [17] M. FARZANEH, T. BAKER, A. BERNSTORF, J. T. BURNHAM, T. CARREIRA, E. CHERNEY, W. A. CHISHOLM, R. CHRISTMAN, R. COLE, J. CORTINAS, C. DE TOURREIL, J. F. DRAPEAU, J. FARZANEH-DEHKORDI, S. FIKKE, R. GORUR, T. GRISHAM, I. GUTMAN, J. KUFFEL, A. PHILLIPS, G. POWELL, L. ROLFSENG, M. ROY, T. ROZEK, D. L. RUFF, A. SCHWALM, V. SKLENICKA, G. STEWART, R. SUNDARARAJAN, M. SZETO, R. TAY et J. ZHANG : Selection of station insulators with respect to ice and snow-part ii : methods of selection and options for mitigation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(1):271–277, 2005. Access-date : 2020-07.
- [18] Fonds de recherche du QUÉBEC : | frqnt | Éviter les courts-circuits sur les isolateurs électriques | masoud farzaneh. <https://www.youtube.com/watch?v=YbtDc5uxXp8>, 2017. Access-date : 2020-08.
- [19] R. ZHENG, R. I. TANNER et X.-J. FAN : *Injection Molding - Integration of Theory and Modeling Methods*. 2011. Access-date : 2018-09.
- [20] K. MAGHSOUDI, R. JAFARI, G. MOMEN et M. FARZANEH : Micro-nanostructured polymer surfaces using injection molding : A review. *Materials Today Communications*, 13:126–143, 2017.
- [21] Institut Pierre Gilles de GENNES : Comprendre la microfluidique. <https://www.institut-pgg.fr>, 2019. Access-date : 2018-03.
- [22] H. ZHOU : *Computer modeling for injection molding : simulation, optimization, and control*. Wiley, Hoboken, N.J., 2013.
- [23] C. RYTKA, J. LUNGERSHAUSEN, P. M. KRISTIANSEN et A. NEYER : 3d filling simulation of micro- and nanostructures in comparison to iso- and variothermal injection moulding trials. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 26(6):065018, 2016.
- [24] C. WENG, M. ZHOU, B. JIANG et H. LV : Improvement on replication quality of electroformed nickel mold inserts with micro/nano-structures. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 75(Supplement C):92–99, 2016. Access-date : 2018-03.
- [25] R. RUPRECHT, T. GIETZELT, K. MÜLLER, V. PIOTTER et J. HAUSSELT : Injection molding of microstructured components from plastics, metals and ceramics. *Microsystem Technologies*, 8(4):351–358, 2002. Access-date : 2018-04.
- [26] M. MATSCHUK et N. B. LARSEN : Injection molding of high aspect ratio sub-100 nm nanostructures. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 23(2):025003, 2012. Access-date : 2019-12.

- [27] B. R. WHITESIDE, M. T. MARTYN, P. D. COATES, P. S. ALLAN, P. R. HORNSBY et G. GREENWAY : Micromoulding : process characteristics and product properties. *Plastics, Rubber and Composites*, 32(6):231–239, 2003. Access-date : 2019-12.
- [28] B. R. WHITESIDE, M. T. MARTYN, P. D. COATES, G. GREENWAY, P. ALLEN et P. HORNSBY : Micromoulding : process measurements, product morphology and properties. *Plastics, Rubber and Composites*, 33(1):11–17, 2004. Access-date : 2019-12.
- [29] H. BECKER et L. E. LOCASCIO : Polymer microfluidic devices. *Talanta*, 56(2):267–287, 2002. Access-date : 2019-06.
- [30] OPENLEARN : Introduction to polymers. <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/science/chemistry/introduction-polymers/content-section-0?active-tab=content-tab>. Access-date : 2018-04.
- [31] M. PACKIANATHER, C. GRIFFITHS et W. KADIR : Micro injection moulding process parameter tuning. *Procedia CIRP*, 33:400–405, 2015. Access-date : 2019-12.
- [32] Y.-C. SU, J. SHAH et L. LIN : Implementation and analysis of polymeric microstructure replication by micro injection molding. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14(3):415–422, 2003. Access-date : 2019-11.
- [33] A. C. LIOU et R. H. CHEN : Injection molding of polymer micro- and sub-micron structures with high-aspect ratios. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(11):1097–1103, 2006. Access-date : 2018-06.
- [34] H.-Y. LIN et W.-B. YOUNG : Analysis of the filling capability to the microstructures in micro-injection molding. *Applied Mathematical Modelling*, 33(9):3746–3755, 2009. Access-date : 2018-05.
- [35] B. SHA, S. DIMOV, C. GRIFFITHS et M. S. PACKIANATHER : Investigation of micro-injection moulding : Factors affecting the replication quality. *Journal of Materials Processing Technology*, 183(2):284–296, 2007. Access-date : 2019-12.
- [36] C. HOPMANN, C. BEHMENBURG, U. RECHT et K. ZEUNER : Injection molding of super-hydrophobic liquid silicone rubber surfaces. *Silicon*, 6(1):35–43, 2014. Access-date : 2019-12.
- [37] S. H. PARK, W. I. LEE, S. N. MOON, Y.-E. YOO et Y. H. CHO : Injection molding micro patterns with high aspect ratio using a polymeric flexible stamper. 2011. Access-date : 2019-09.
- [38] M. S. DESPA, K. W. KELLY et J. R. COLLIER : Injection molding of polymeric ligaments. *Microsystem Technologies*, 6(2):60–66, 1999. Access-date : 2019-06.
- [39] J. ZHAO, R. H. MAYES, G. CHEN, P. S. CHAN et Z. J. XIONG : Polymer micromould design and micromoulding process. *Plastics, Rubber and Composites*, 32(6):240–247, 2003. Access-date : 2019-05.
- [40] L. YU : *Experimental and Numerical Analysis of Injection Molding with Microfeatures*. Thesis, 2004. Access-date : 2018-04.

- [41] G. LUCCHETTA, M. SORGATO, S. CARMIGNATO et E. SAVIO : Investigating the technological limits of micro-injection molding in replicating high aspect ratio micro-structured surfaces. *CIRP Annals*, 63(1):521–524, 2014. Access-date : 2019-06.
- [42] M. HECKELE et W. K. SCHOMBURG : Review on micro molding of thermoplastic polymers. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14(3):R1, 2004. Access-date : 2018-06.
- [43] E. S. ORAN et J. P. BORIS : *Numerical simulation of reactive flow*. Elsevier, 1987. Access-date : 2018-12.
- [44] ALLOPROF : Les matières plastiques. <http://www.alloprof.qc.ca/BV/pages/s1550.aspx>élasto. Access-date : 2018-04.
- [45] S. ABBASI : *Rheology, Properties and Microstructure Development of Polymer/Carbon Nanotube Composites in Micro Injection Moulding Process*. Thesis, 2009. Access-date : 2018-07.
- [46] S.D.J. HILL, K.R. KAMPER, U. DASBACH, J. DOPPER, W. EHRFELD et M. KAUPERT : An investigation of computer modeling for micro-injection molding. *WIT Transactions on The Built Environment*, 13:9, 1970. Access-date : 2018-06.
- [47] Y. KIM : *Investigation of micro and nanoscale surfaces replication using injection molding*. Thesis, 2012. Access-date : 2018-02.
- [48] A. KOLEV ANGELOV : *Numerical and Experimental Studies in Development of Polymer Micro Injection Molding*. Thesis, 2007. Access-date : 2018-04.
- [49] M. LA, J. G. LEE et S. J. PARK : Numerical and experimental investigation of plastic injection molding of micro-engineered surfaces. *Polymer Engineering and Science*, 58(S1):E73–E81, 2017. Access-date : 2018-04.
- [50] S.-J. CHOI et S. K. KIM : Multi-scale filling simulation of micro-injection molding process. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(1):117–124, 2011. Access-date : 2018-04.
- [51] R. GHEISARI, P. J. BÁRTOLO et N. GODDARD : Visualization of flow behaviour in micro-cavities during micro injection moulding. *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 9:1187–1195, 2015. Access-date : 2018-05.
- [52] C. A. GRIFFITHS : *Micro Injection Moulding : Tooling and Process Factors*. Thesis, 2008. Access-date : 2018-05.
- [53] Y. DONGGANG et K. BYUNG : Simulation of the filling process in micro channels for polymeric materials. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 12(5):604, 2002. Access-date : 2018-04.
- [54] O. C. GHEORGHE, T. D. FLORIN, G. T. VLAD et D. T. GABRIEL : Optimization of micro injection molding of polymeric medical devices using software tools. *Procedia Engineering*, 69(Supplement C):340–346, 2014. Access-date : 2018-01.

- [55] B. JIANG, H. PENG, W. WU, Y. JIA et Y. ZHANG : Numerical simulation and experimental investigation of the viscoelastic heating mechanism in ultrasonic plasticizing of amorphous polymers for micro injection molding. *Polymers*, 8(5):12, 2016. Access-date : 2018-09.
- [56] D. JUÁREZ, R. BALART, T. BORONAT, M. J. REIG et S. FERRÁNDIZ : Validation of the use of sebs blends as a substitute for liquid silicone rubber in injection processes. *Materials and Manufacturing Processes*, 28(11):1215–1221, 2013. Access-date : 2018-03.
- [57] F. BARUFFI, M. CALAON et G. TOSELLO : Effects of micro-injection moulding process parameters on accuracy and precision of thermoplastic elastomer micro rings. *Precision Engineering*, 51:353–361, 2018.
- [58] C. HOPMANN, Matthias THEUNISSEN et Stefan HAASE : *Analysis of the process influences on injection molded thermosets filled with hollow glass bubbles*, volume 38. 2018. Access-date : 2019-02.
- [59] A. ARRILLAGA, A. M. ZALDUA et A. S. FARID : Evaluation of injection-molding simulation tools to model the cure kinetics of rubbers. *Journal of Applied Polymer Science*, 123(3): 1437–1454, 2012. Access-date : 2018-07.
- [60] OMNEXUS : Silicone rubber : Complete guide on highly durable elastomer. <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/silicone-rubber-elastomer>, 2019. Access-date : 2018-02.
- [61] J.-F. HÉTU, D. M. GAO, A. GARCIA-REJON et G. SALLOUM : 3d finite element method for the simulation of the filling stage in injection molding. 38:223–236, 1998. Access-date : 2018-05.
- [62] K. J. DONOVAN : *Computational fluid dynamics modeling of two-dimensional and three-dimensional segmented flow in microfluidics chips*. Thesis, San José, 2014. Access-date : 2018-04.
- [63] G. COURBEBASSE : Numerical simulation of injection moulding process and the pre-modelling concept. *Computational Materials Science*, 34(4):397–405, 2005. Access-date : 2018-04.
- [64] A. M. TOM : *An investigation of micro scale fabrication using the injection molding process*. Thesis, 2007. Access-date : 2018-03.
- [65] M. MOGUEDET, R. LE GOFF, P. NAMY et Y. BÉREAUX : Level set method for fully thermal-mechanical coupled simulations of filling in injection and micro-injection molding process. *COMSOL conference*, 2009. Access-date : 2018-01.
- [66] C. PAPADIMITRIOU et K. STEIGLITZ : *Combinatorial Optimization*. Courier Corporation, University of California-Berkeley, 1981. Access-date : 2019-06.
- [67] M.-H. TSAI, K.-L. OU, C.-F. HUANG, H.-C. CHENG, Y.-K. SHEN, C.-Y/ CHANG, C.-H. WU, J.-H. CHEN et Jr. GUAN, P. : Study on micro-injection molding of light guiding plate by numerical simulation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(9):1097–1100, 2008. Access-date : 2018-03.

- [68] C. A. CHUNG : *Simulation modeling handbook : a practical approach*. CRC Press, 2004. Access-date : 2018-04.
- [69] Visiativ INDUSTRY : Simulation numérique : définition et enjeux. <https://www.visiativ-industry.fr/simulation-numerique-definition-enjeux>. Access-date : 2018-12.
- [70] Futura TECH : Simulation informatique. futura-sciences.com. Access-date : 2019-02.
- [71] J. R. A. PEARSON : *Mechanical principles of polymer melt processing*. 1966. Access-date : 2018-02.
- [72] C. WEI, K. LINGCHAO, L. QIAN, Y. JIN et S. CHANGYU : Model and simulation for melt flow in micro-injection molding based on the ptt model. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 19(8):085003, 2011. Access-date : 2018-04.
- [73] C. W. HIRT et B. D. NICHOLS : Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1):201–225, 1981. Access-date : 2018-07.
- [74] J. H. LEE : *Drug delivery microdevice : Design, simulation, and experiments*. Thesis, Richmond, Virginia, 2013. Access-date : 2018-01.
- [75] R. SURACE, G. TROTTA, V. BELLANTONE et I. FASSI : *The micro injection moulding process for polymeric components manufacturing*. InTech, 2012. Access-date : 2019-02.
- [76] H. GRZYBOWSKI et R. MOSDORF : Modelling of two-phase flow in a minichannel using level-set method. *Journal of Physics : Conference Series*, 530(1):012049, 2014. Access-date : 2018-03.
- [77] R. GHEISARI, P. J. BÁRTOLO et N. GODDARD : Analysis for microstructure of micro-cantilevers arrays in micro-injection molding by using numerical simulations. *AIP Conference Proceedings*, 1779(1):050016, 2016. Access-date : 2018-11.
- [78] S.-W. KIM et L.-S. TURNG : Three-dimensional numerical simulation of injection molding filling of optical lens and multiscale geometry using finite element method. *Polymer Engineering & Science*, 46(9):1263–1274, 2006. Access-date : 2018-08.
- [79] S.-W. KIM et L.-S. TURNG : Developments of three-dimensional computer-aided engineering simulation for injection moulding. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 12(3):S151, 2004. Access-date : 2018-06.
- [80] Dassault SYSTÈMES : Solidworks 2020 | stimuler l'innovation en matière de conception. <https://www.solidworks.com/fr>, 2020. Access-date : 2018-01.
- [81] T. BENSON : Reynolds number. <https://www.grc.nasa.gov/WWW/BGH/reynolds.html>, 2014. Access-date : 2018-02.
- [82] E. SAUDRAIS : Mécanique des fluides - Écoulement des fluides réels. *CPGE PSI Jacam*, page 2, 2012-2013. Access-date : 2020-07.
- [83] H. LOMBAERT : Level set method : explanation. <https://profs.etsmtl.ca/hlombaert/levelset/>, 2006. Access-date : 2018-11.

- [84] F. M. WHITE : *Viscous fluid flow*. McGraw Hill, New York, 2006. Access-date : 2018-12.
- [85] R. W. PRYOR : *Multiphysics modeling using COMSOL : a first principles approach*. Jones and Bartlett, 2011. Access-date : 2018-02.
- [86] Wacker AG CHEMIE : Solid silicone rubber (htv). <https://www.wacker.com/cms/en-us/products/product-groups/silicone-rubber/silicone-rubber-overview.html>. Access-date : 2018-01.
- [87] MATWEB : Matweb, your source for materials information. <http://www.matweb.com>, 2020. Access-date : 2017-10.
- [88] Q. SU, N. ZHANG et D. GILCHRIST MICHAEL : The use of variotherm systems for microinjection molding. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(9), 2015. Access-date : 2018-06.
- [89] R. THIRUVENKATASWAMY : *Controlling dimensions when injection molding microfluidic devices*. Thesis, 2007.
- [90] H. OU, M. SAHLI, T. BARRIERE et J.C. GELIN : Etude des propriétés rhéologiques et de vulcanisation des élastomères silicones bi-composants. In *21ème Congrès Français de Mécanique*, 2013. Access-date : 2019-07.
- [91] Suhaimi MISHA : Comparison between 2d and 3d simulations of a tray dryer system using cfd software. *World Applied Sciences Journal*, 29:1301–1309, 2014. Access-date : 2020-09.
- [92] J. DE CONINCK, F. DUNLOP et T. HUILLET : Metastable wetting. *Journal of Statistical Mechanics : Theory and Experiment*, 2011(06):P06013, 2011. Access-date : 2019-03.
- [93] F. GAUDIÈRE : *Développement de revêtements bioactifs pour les biomatériaux : Modulation des comportements cellulaires en fonction du microenvironnement physico-chimique et mécanique*. Thèse de doctorat, 06 2013. Access-date : 2018-06.
- [94] Inc. MANUFACTURING SERVICES : What is thermoset molding? <https://msicarolina.com/2016/05/06/what-is-thermoplastic-molding/>, 2018. Access-date : 2018-04.
- [95] Kiet MOOKJAI : *Écoulement de fluides incompressibles newtoniens.*, 2020. Access-date : 2019-05.