

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].

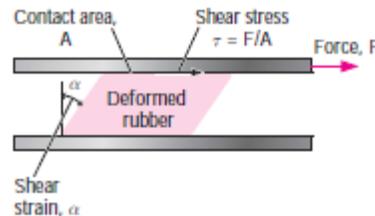


FIGURE 2.1 – Déformation d'un fluide soumis à un effort en cisaillement τ (Source : [10])

— 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 :

- SV pour l'interface Solide/Vapeur
- SL pour l'interface Solide/Liquide

— LV pour l'interface Liquide/Vapeur

— σ représente la tension de surface entre deux états

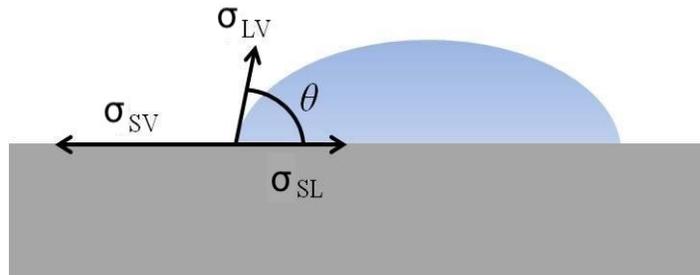


FIGURE 2.2 – *Modèle de Young [92]*

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.

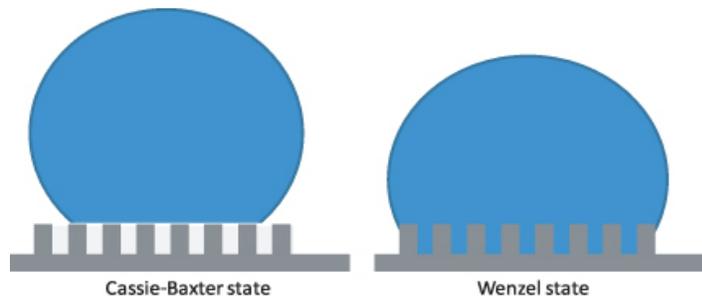


FIGURE 2.3 – *Modèles de mouillage [93]*

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.

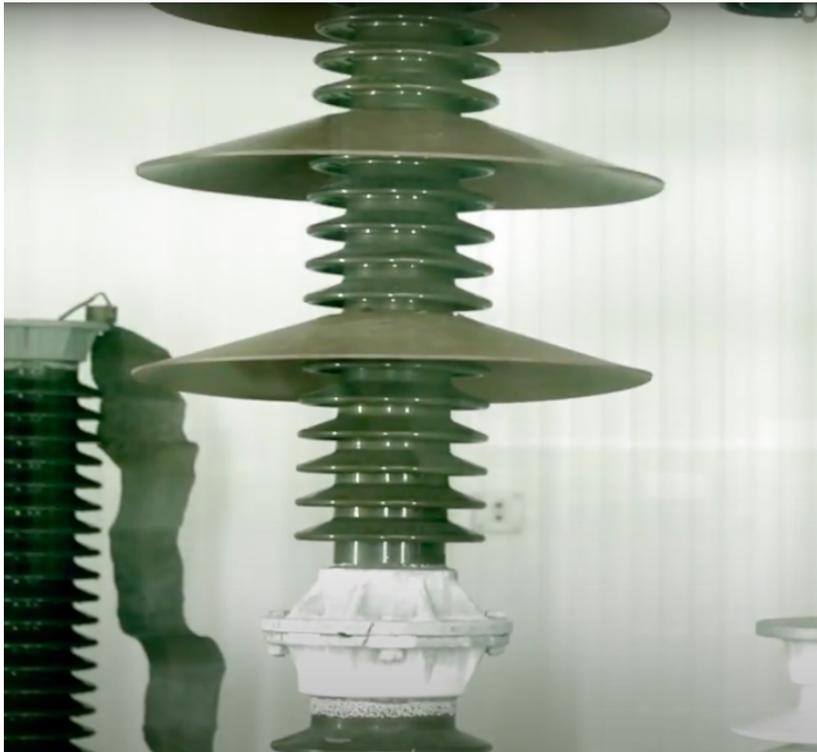


FIGURE 2.4 – Jupes auxiliaires utilisées par l'équipe du pavillon du givrage afin de protéger les isolateurs des contaminants extérieurs [17].

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.

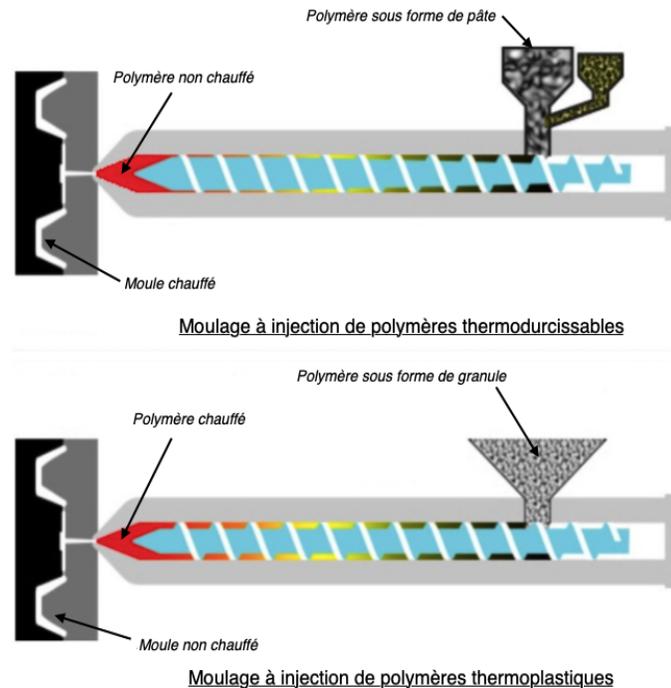


FIGURE 2.5 – Principe du moulage à injection de polymère [94]. Schématisation du moulage à injection de polymères thermoplastiques et thermodurcissables.

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 réplication 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 réplication [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 microstructures. 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 réplique, 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 Styrene (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-oléfin 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 diffèrent 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.

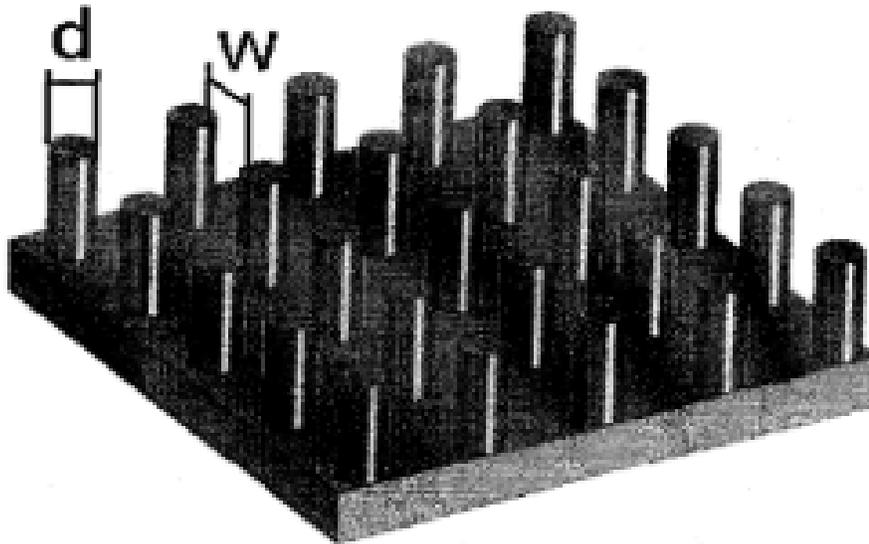


FIGURE 2.6 – Géométrie des plaques avec micro-piliers de la thèse de Kolev Angelov [48] avec d le diamètre du pilier et w la distance entre chaque piliers. Les piliers ont des dimensions comprises entre 25 nm et $23 \mu\text{m}$.

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.

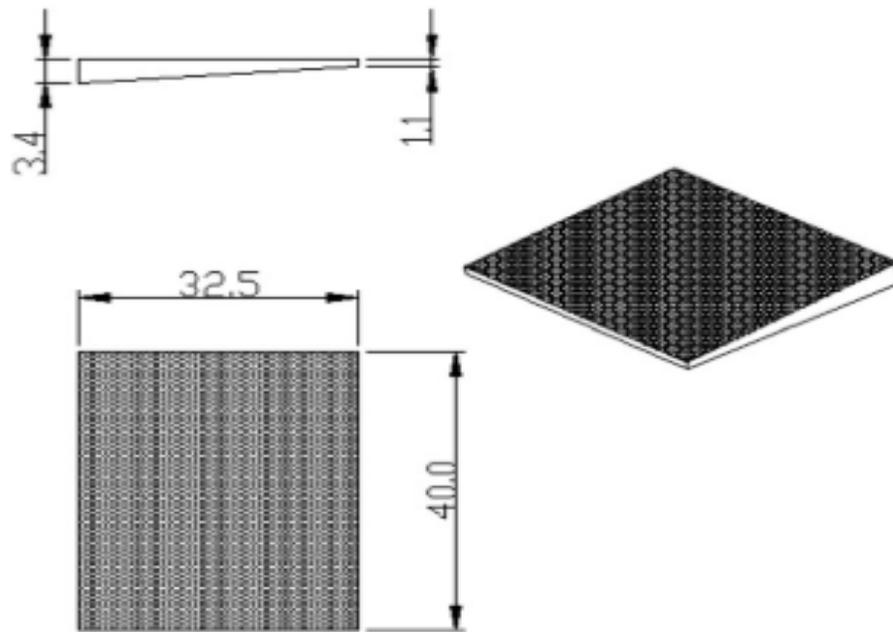


FIGURE 2.7 – Dimension de la plaque guide de lumière de l'article de Tsai [67] et al.. La plaque guide de lumière a une longueur l de 40,0 mm et une largeur de 32,5 mm. La partie la plus épaisse de la plaque de lumière est de 3,4 mm et la partie la plus fine est à 1,0 mm.

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 1 mm
- 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.

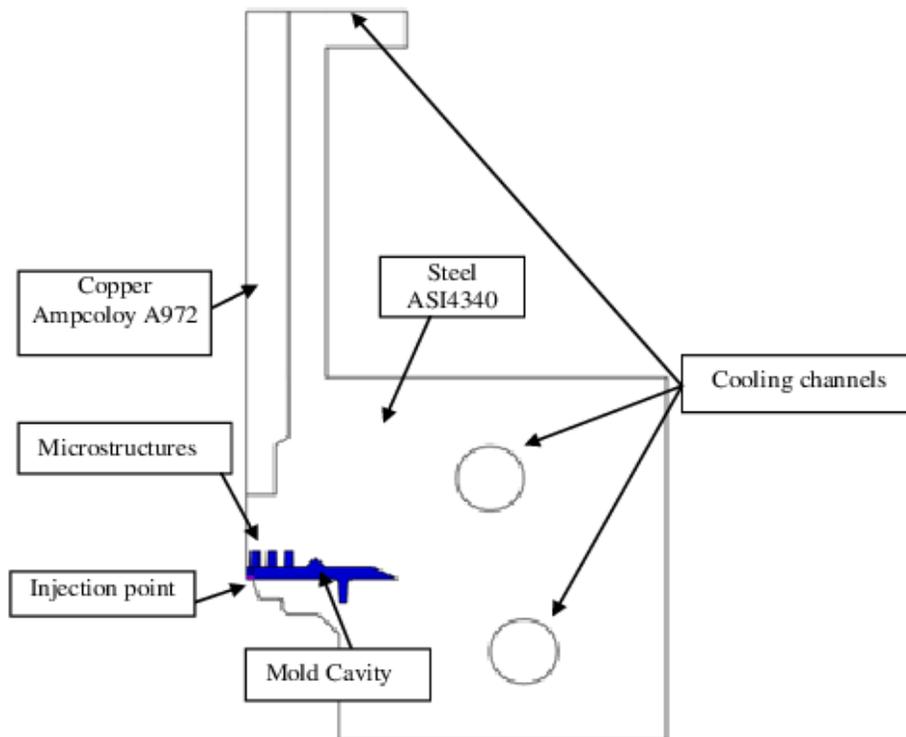


FIGURE 2.8 – Représentation en coupe du moule axisymétrique de l'article de Mael Moguedet et al. [65] Les microtextures testées dans cet article sont de dimensions comprises entre 0,05 mm et 0,2 mm.

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.

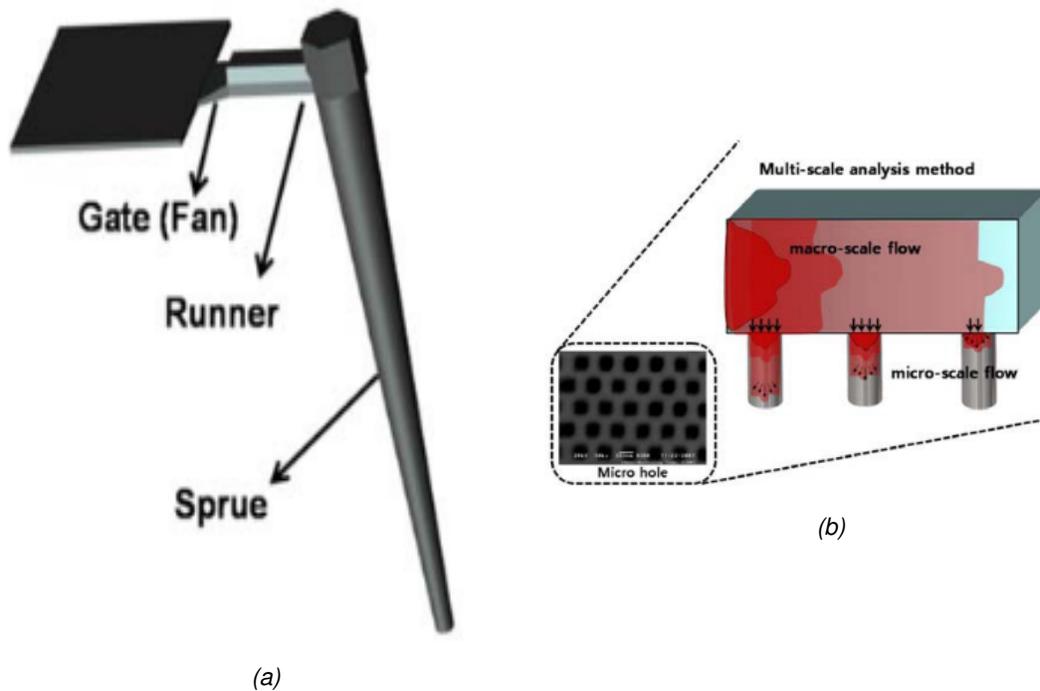


FIGURE 2.9 – Géométrie de l'article de Choi et al. [50]. (a) : Géométrie complète de la plaque (b) : Organisation multi-échelle entre le domaine macroscopique et microscopique.

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.

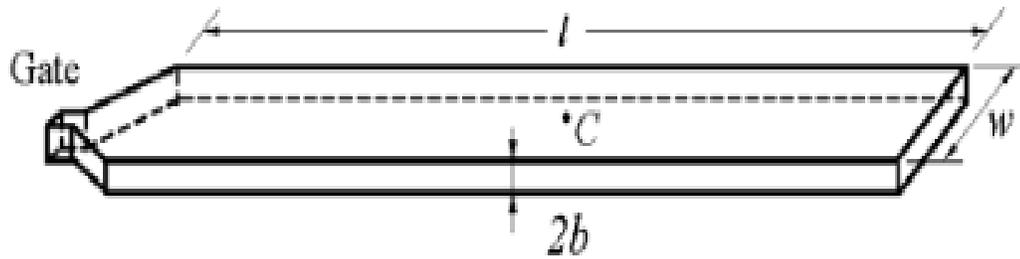


FIGURE 2.10 – Géométrie choisie pour l'étude de l'écoulement dans un micro-canal par Donggang et al. [53]. L'épaisseur b de la géométrie est soumise à des variations entre $0,1\mu\text{m}$ et $10\mu\text{m}$. La longueur l et la largeur w ne sont pas communiquées.

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.

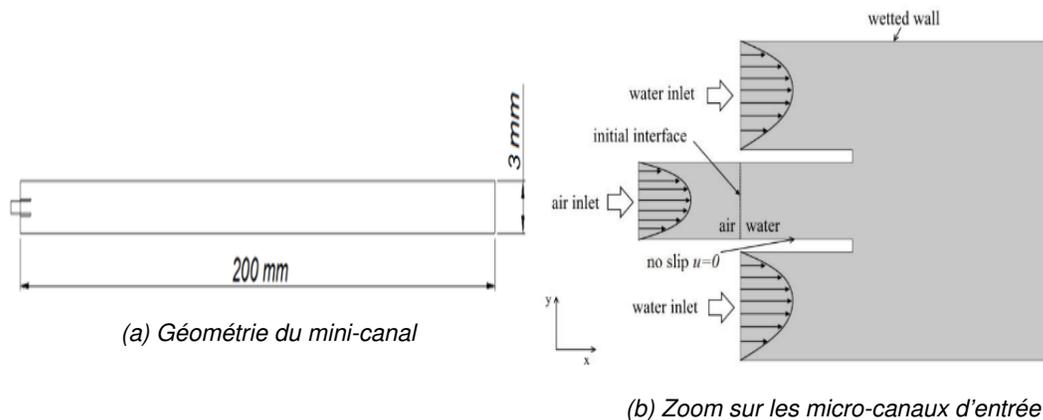


FIGURE 2.11 – Géométrie de l'article de Grzybowski et al. [76] pour leur expérimentation sur la propagation de bulles dans des micro-canaux. Les bulles sont injectées dans le canal du milieu ayant pour diamètre $d = 0,7\mu\text{m}$

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.

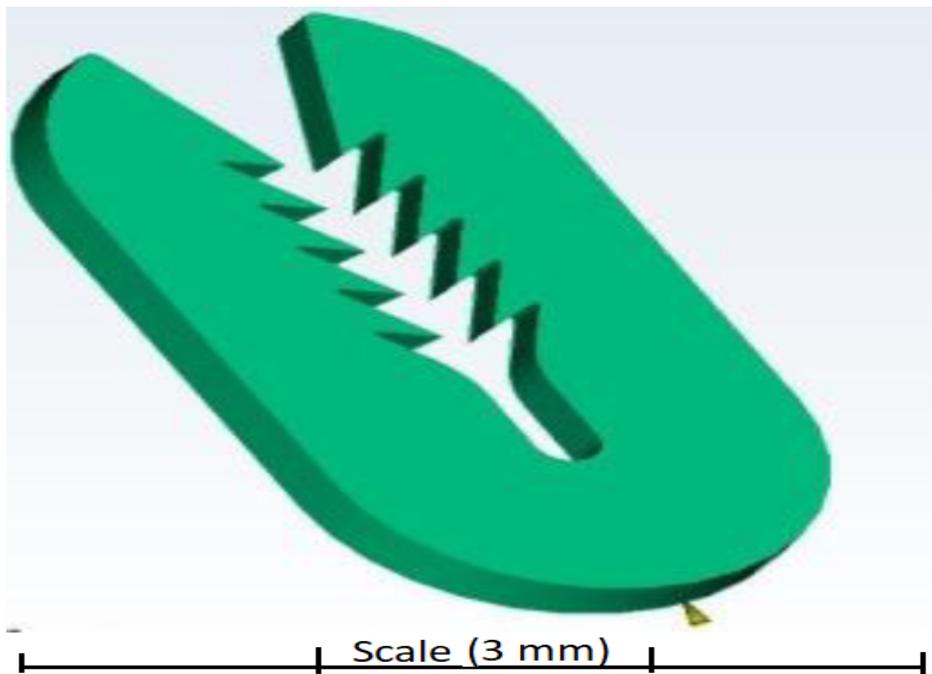


FIGURE 2.12 – Outil médical en polymère de l'article de Gheorghe et al. [54]. L'outil médical a des dimensions de l'ordre du millimètre.

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.

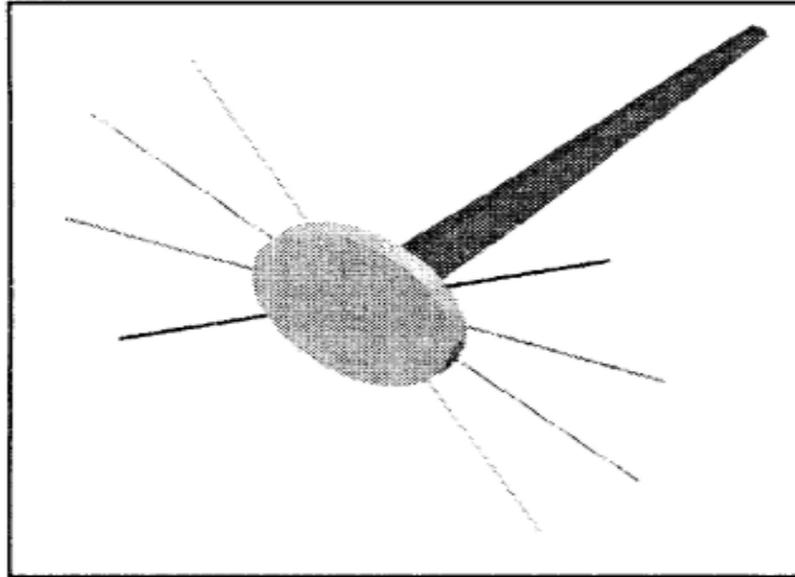


FIGURE 2.13 – Géométrie de la micropompe en forme d'étoile [46]. La plaque circulaire de base a 3 mm de d'épaisseur et 10 mm de rayon. Les micro-canaux rectangulaires situés au niveau de la base circulaire sont longs de 37 mm et ont une largeur de 400 μm .

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[®].

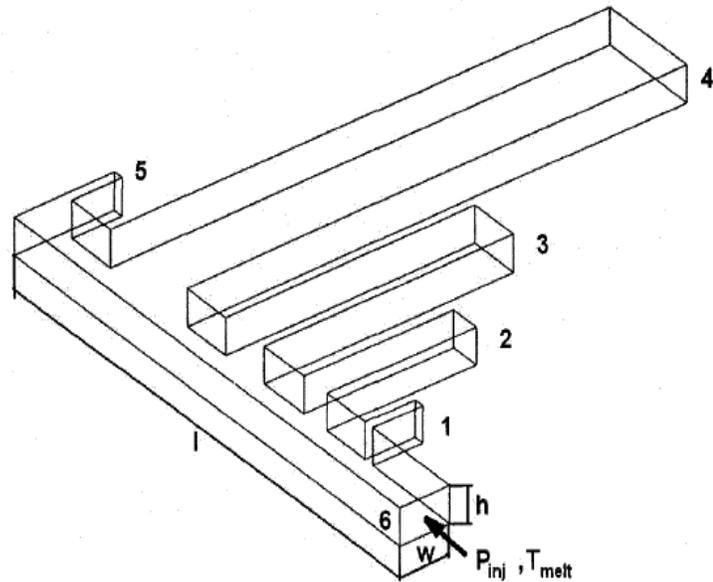


FIGURE 2.14 – Représentation schématique de la géométrie 3D utilisée par Kolev Angelov [48] pour ses simulations. Celle-ci consiste en six canaux de longueur (l) et de largeur (w) variables, mais de hauteur ($h = 30 \mu\text{m}$) similaire. Pour chaque canaux, les dimensions en micromètres (w, l) sont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

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.