Fabrication additive et propriétés de surface : quel impact sur les écoulements et les transferts dans les contacteurs ?

Hélène CHAUMAT, David ROUZINEAU, Carine JULCOUR, Anne-Marie BILLET

Affiliation : Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse

Introduction

La fabrication additive permet de réaliser des géométries inaccessibles par usinage soustractif, ce qui ouvre bien des perspectives, notamment dans le domaine des contacteurs et des réacteurs. Au Laboratoire de Génie Chimique, des pilotes de réacteurs-échangeurs structurés novateurs, ainsi que des internes ou des garnissages inédits pour les colonnes intensifiées d'absorption ou de distillation ont ainsi pu être développés. De leur côté, les imprimeurs s'intéressent aux propriétés de surface des objets imprimés, recherchant en général des surfaces aussi lisses que possible pour faciliter la mise en peinture ou en étanchéité des pièces produites. Outre les post-traitements mécaniques ou chimiques, des paramètres de fabrication permettent d'obtenir des rugosités de surface différentes : orientation de la pièce par rapport au support de construction, vitesse de balayage du laser, température… Or, les auteurs de ce travail ont constaté un effet significatif de la nature du matériau imprimé et de son état de surface sur :

- la forme des bulles de Taylor dans des canaux millimétriques de réacteurs structurés,
- l'accroche de la couche catalytique déposée en paroi de ces canaux,
- l'efficacité de mouillage et l'épaisseur de film ruisselant dans les contacteurs gaz-liquide à garnissage.

A ce jour cependant, aucune relation quantitative n'a été établie entre ces propriétés, les paramètres d'impression et les performances des procédés associés. L'objectif de ce travail est, dans un premier temps, de caractériser les états de surface de différents matériaux et d'évaluer l'impact de l'orientation de la pièce lors de sa fabrication.

Trois critères permettant de caractériser l'état de surface ont été retenus :

- L'angle de contact statique (à l'équilibre) d'une goutte, qui permet d'estimer le mouillage,
- L'angle de contact dynamique qui caractérise l'hystérèse du mouillage lors de l'écoulement lié à la présence d'hétérogénéités physiques et/ou chimiques
- La rugosité, qui caractérise la surface du matériau.

Ces paramètres ne sont donc pas indépendants (cf. modèle de Wenzel et de Cassie-Baxter), mais apportent un éclairage différent sur les états de surface.

Méthodologie

Différents matériaux sont analysés :

- des matériaux de référence, utilisés en usinage classique : acier inoxydable et verre.
- des matériaux fabriqués additivement en résines photosensibles par stéréolithographie (SLA) avec une résolution de 50 µm : résines Vitra, Invicta et ThermaDM500 du fournisseur3D Solution. Ces résines, utilisées couramment au laboratoire, ont été choisies respectivement pour leur transparence, leur surface lisse ou leur résistance thermique. Pour chaque résine, des éprouvettes ont été imprimées au laboratoire selon des orientations différentes (horizontale, verticale et à 45°), induisant des états de surface différents.
- Des matériaux fabriqués additivement en aluminium par fusion de lit de poudre (SLM) avec une résolution d'impression de l'ordre de 0,1 mm. Les éprouvettes ont été imprimées verticalement ou horizontalement par l'entreprise Freyssinet Aero.

Les angles statiques et dynamiques sont obtenus à l'aide d'un goniomètre Krüss DSA100 avec de l'eau ultra-pure. Pour la méthode statique, les mesures sont faites sur 15 à 30 gouttes de 5 µL déposées à

différents endroits du matériau. Les angles dynamiques sont quant à eux obtenus en filmant l'inclinaison progressive de la plateforme du goniomètre : les angles à l'avancée et au retrait sont mesurés lorsque la goutte se décroche (Figure 1 a). Dans ce cas, 3 essais sont réalisés avec un volume de goutte de 40 µL, afin d'assurer un écoulement avec les différents matériaux.
Enfin, les hauteurs des défauts de surface, les pics et les vallées, sont évalués grâce à un microscope interférométrique et confocal de la marque Sensofar modèle S-Neox (exemple en Figure 1 b).

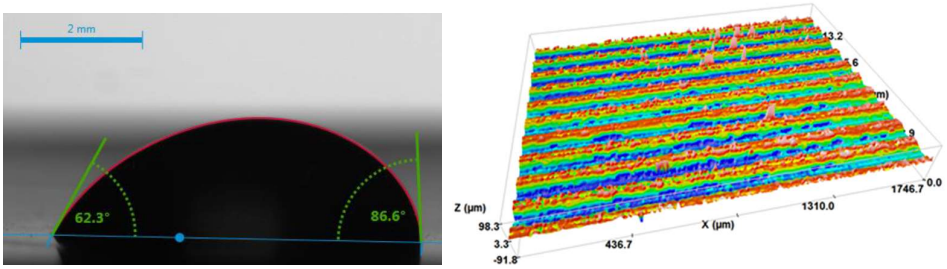

Figure 1 : a) Mesure de l'angle d'avancée (à gauche) sur une goutte d'eau en mouvement : ligne de base en bleu, tangentes en vert, contour détecté en rouge. b) Mesure des amplitudes de rugosité (variation de focus x10) sur la pièce imprimée à 45° en résine transparente VITRA.

Résultats

On constate pour la majorité des éprouvettes donne un angle de contact statique entre 60 et 80°. Seuls certains matériaux imprimés à 45° présentent des angles supérieurs à 80°. Le verre, très mouillant, a un angle de contact plus faible, de l'ordre de 40°. Concernant l'angle dynamique, on observe globalement que la majorité des matériaux ont un angle d'avancée compris entre 70° et 90° environ et un angle de retrait entre 10° et 30°. Le verre fait exception avec un angle d'avancée faible, d'environ 45°. Une tendance semble se dégager pour les résines : l'angle d'avancée des plaques imprimées verticalement est plus important que celui des plaques imprimées horizontalement pour un même matériau. Cela montre que les plaques fabriquées verticalement sont plus rugueuses que les plaques imprimées horizontalement. Par ailleurs de fortes variations sont observées sur les résines à 45° en fonction du sens d'observation (parallèle ou perpendiculaire aux stries). Aucun écoulement n'a pu être observé lorsque les stries s'opposaient à l'écoulement.

Les résultats de la microscopie interférométrique et confocal, montrent que :
-Les matériaux de référence (acier et verre) sont les plus « lisses » : l'acier avec une hauteur moyenne de rugosité (R_A) de 0,5 µm et des pics et des vallées de profondeur inférieure à 7 µm et le verre, le plus lisse des matériaux testés (R_A~4 nm), avec des pics atteignant néanmoins ~80 µm.
- Les résines imprimées 3D imprimées verticalement ou horizontalement montrent globalement des hauteurs faibles de rugosité moyenne (R_A < 1 µm), avec des pics inférieurs à 90 µm. Toutefois les pièces imprimées à 45° atteignent R_A~ 10 µm, avec des pics de 170 µm : ceci s'explique notamment par le déplacement latéral du laser pour respecter la pente à 45°, déplacement qui crée des stries sur la pièce, parfois visibles à l'œil nu.
- La pièce imprimée en aluminium montre les pics et les vallées les plus marqués (jusqu'à 360 µm), et une hauteur moyenne de rugosité élevée (R_A~16 µm), en accord avec une moindre résolution d'impression que les résines.

Conclusion et perspectives

La connaissance de la rugosité et des angles de contact statiques et dynamiques sont complémentaires pour caractériser l'état de surface des matériaux. L'étude montre clairement que la nature du matériau utilisé en fabrication additive (ici métal ou résines), et l'angle d'inclinaison de la surface lors de l'impression, jouent un rôle majeur dans l'état de surface de la pièce finale. L'étude se poursuit actuellement par l'évaluation de l'hydrodynamique et du transfert gaz-liquide en maquettes froides fabriquées additivement.