



## Étude du comportement des gouttelettes d'eau impactant des surfaces micro-structurées

Par

Bassem Bouazara  
M. Sc. A. CPI.

Directeur : Prof. Gelareh Momen  
Co-directeur : Prof. Reza Jafari

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI  
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE  
Pour l'obtention du grade de maîtrise en sciences appliquées

Mars 2022

Québec, Canada

© Bassem Bouazara

À MON DÉFUNT PÈRE,

À MA MÈRE, À MA SŒUR ET À MES FRÈRES,

À MA FAMILLE

## Résumé

Ce sujet de mémoire sera intitulé ainsi : étude de l'impact de gouttelette d'eau sur des surfaces micro-structurées. Cette étude consiste à fabriquer différents modèles de surfaces micro-structurées en utilisant des substrats à base de polymère et de métal (le Kapton et l'aluminium). Cette différence entre ces modèles est définie par la variation de la distance entre les trous ( $S$ ) 100-300  $\mu\text{m}$  avec un pas de 25  $\mu\text{m}$ , ainsi que les diamètres de ces trous ( $d_1 = 75 \mu\text{m}$  et  $d_2 = 100 \mu\text{m}$ ). Une approche mécanique est adoptée pour créer la texture de la surface grâce à une machine à commande numérique. Dans cette phase de travail, des surfaces avec deux diamètres différents ont été créées, il paraît que les surfaces à base d'aluminium portent moins de résidus par rapport à celles à base de kapton. Une réplication des motifs est faite grâce au moulage par compression en utilisant une machine de compression. Le Polydiméthylsiloxane (PDMS) est utilisé comme matériau de base pour réaliser les micro-structures. En fait, cette réplication des textures permet d'étudier et d'observer le comportement dynamique des gouttelettes d'eau sur les différents motifs des surfaces créées. En raison des résidus attachés sur la surface de Kapton, les surfaces de PDMS à base d'aluminium se sont bien répliquées par rapport à celles à base de kapton. La mesure de l'angle de contact ainsi que l'hystérésis de l'angle de contact confirment que les surfaces de PDMS à base d'aluminium, ayant un diamètre de 75  $\mu\text{m}$ , sont des surfaces superhydrophobes pour les deux volumes de gouttelette d'eau (10 et 20  $\mu\text{l}$ ).

La variation de la vitesse d'impact, le diamètre de la gouttelette ainsi que la géométrie de la micro-structure (la hauteur ( $h$ ), le diamètre et l'espacement centre à centre du pilier) de la surface de la gouttelette d'eau et leurs impacts sur le comportement de gouttelette d'eau ont été étudiées. Cet impact est enregistré par une caméra à haute vitesse qui est connectée à un ordinateur.

D'une part, le rebondissement complet pourrait être présent dans le cas des micro-structures régulières de  $d = 75 \mu\text{m}$ ,  $h = 90 \mu\text{m}$  et  $S = 125-150 \mu\text{m}$  pour le volume de gouttelette de l'eau à 10  $\mu\text{l}$ . Ce comportement est présent lorsque  $We < 20$ ,  $Re < 1230$  ainsi que le paramètre d'épandage maximal ( $\beta$ )  $< 4$ , il existe également un rebondissement complet au même ( $d$ ) et ( $h$ ) avec  $S = 175 \mu\text{m}$  lorsqu'on utilise le volume de 20  $\mu\text{l}$ . D'autre part, le rebondissement partiel s'observe pour la quasi-totalité des micro-structures ayant un diamètre de 100  $\mu\text{m}$  où  $We < 150$  et  $Re < 4500$ . De plus, l'éclaboussure rapide et la récession de rupture se remarquent où la cinétique est élevée ( $We > 150$ ) pour les deux

volumes de gouttelettes d'eau. L'apparition du rebondissement est diminuée lorsque la cinétique de la chute de la gouttelette augmente (la vitesse de l'impact), la géométrie de la surface ou le volume de la gouttelette d'eau augmentent.

Ce travail nous a permis de mettre en évidence les micro-structures les plus appropriées pour avoir des surfaces superhydrophobes avec des comportements de rebondissement. De plus, l'effet des conditions des gouttelettes d'eau (taille, vitesse d'impact etc.) sur le comportement de ces surfaces sont examiné.

Il convient de noter qu'en utilisant une méthode industriellement applicable pour produire ces surfaces (usinage CNC), cette étude pourrait ouvrir de nouvelles voies dans la fabrication des surfaces hydrophobes et/ou superhydrophobes à l'échelle industrielle.

**Mots-clés :** CNC (machine à commande numérique), kapton, réplication, PDMS, micro-structure, mouillabilité, comportement, gouttelette, rebondissement et caméra à haute vitesse.

## Abstract

This study consists of manufacturing different models of micro-structured surfaces using polymer and metal substrates (Kapton and aluminum). This difference between these models is defined by the variation of the distance between the holes ( $S$ ) 100-300 $\mu\text{m}$  with increment of 25  $\mu\text{m}$ , as well as the diameters of these holes ( $d_1 = 75 \mu\text{m}$  et  $d_2 = 100 \mu\text{m}$ ). A mechanical approach was used to create the texture of the surface using a numerically controlled machine. In this phase of work, surfaces with two different diameters have been created. It seems that the surfaces based on aluminum carry less residues compared to those based on kapton. A replication of the patterns is done through compression molding using a compression machine. The Polydiméthylsiloxane (PDMS) was used as the basic material for the micro-structures. In fact, this replication of the textures allows us to study and observe the dynamic behaviour of water droplets on the different patterns of the created surfaces. Due to the residues attached on the surface, it seems that the aluminum-based PDMS surfaces are well replicated compared to the kapton-based ones. The contact angle measurement as well as the contact angle hysteresis confirm that the aluminum based PDMS surfaces with a diameter of 75  $\mu\text{m}$  are superhydrophobic surfaces for both water droplet volumes (10 and 20  $\mu\text{l}$ ).

The variation in impact velocity, droplet diameter as well as the microstructure geometry (the height ( $h$ ), diameter and center-to-center spacing of the pillar) of the water droplet surface have been studied. The impact of these different parameters on droplet behavior was also studied. This impact is recorded by a high-speed camera connected to a computer.

On the one hand, complete rebound could be present in the case of regular micro-structures of  $d = 75 \mu\text{m}$ ,  $h = 90 \mu\text{m}$  and  $S = 125-150 \mu\text{m}$  for the water droplet volume at 10  $\mu\text{l}$ . This behavior is present when  $\text{We} < 20$ ,  $\text{Re} < 1230$  as well as the maximum spreading parameter ( $\beta$ )  $< 4$ , a complete rebound also exists at the same ( $d$ ) and ( $h$ ) with  $S = 175 \mu\text{m}$  when using the 20  $\mu\text{l}$  volume. On the other hand, partial rebound is observed for almost all micro-structures with a diameter of 100  $\mu\text{m}$  where  $\text{We} < 150$  and  $\text{Re} < 4500$ . Furthermore, rapid splash and breakup recession are noticed in the case of high kinetics (high impact velocity) values ( $\text{We} > 150$ ) for both volumes of water. The likelihood of the bouncing is decreased when the droplet falls kinetics increased (the impact speed), the geometry of the surface or the volume of the water droplet have been increased.

This work highlights the most appropriate micro-structures to have hydrophobic and/or superhydrophobic surfaces with rebound behaviors. In addition, the effect of water droplet conditions (size, impact velocity etc.) on the behavior of these surfaces is examined.

It should be noted that by using an industrially applicable method to produce these surfaces (CNC machining), this study could open new avenues in the fabrication of hydrophobic and/or superhydrophobic surfaces on an industrial scale.

**Keywords:** CNC (Computerized Numerical Control), Kapton, replication, PDMS, microstructure, wettability, behaviour, droplet impact, bouncing, high speed camera.

## **Remerciements**

Je tiens, tout d'abord, à remercier ma directrice de recherche et mon co-directeur, la professeure Gelareh Momen ainsi que le professeur Reza Jafari, pour leurs aides, conseils et leurs consultations fructueuses qu'ils m'ont accordés. Ses engagements et ses intérêts ont constitué une réelle source de motivation.

Je tiens à exprimer mes sincères sentiments de gratitude aux techniciens du laboratoire (CENGIVRE) sans exception pour leurs soutiens et leurs idées qui m'ont amené à finaliser mon projet avec succès. Un gros merci à Khosrow, Samaneh, Nathalie Gagné ainsi qu'à Carole Mercier. Merci également à Pierre Camirand, à Yann Gerard. Je voudrais remercier mes amis Fatma Rebaine, Mostepha Saihi et Khaled Ragab pour leurs aides.

J'offre mes grâitudes à tous les membres du groupe du laboratoire.

Je voudrais exprimer ma gratitude à l'organisme (CRSNG) pour son soutien financier.

Finalement, une reconnaissance particulière à ma mère Messaouda, ma sœur Saida, mes deux frères Abdeldjalil et Bahaeddine, mon oncle Mohamed, et toute ma famille paternelle et maternelle pour leurs soutiens et leurs encouragements. Vous m'avez tous aidé à poursuivre jusqu'au bout.

Merci à mon copain Mouloud et à tous mes amis pour leurs motivations.

## Table des matières

Résumé .....	iii
Abstract .....	v
Remerciements .....	vii
Liste des figures.....	xi
Liste des équations .....	xi
Liste des tableaux .....	xiv
Sigles .....	xv
Nomenclatures.....	xvi
CHAPITRE 1.....	1
INTRODUCTION.....	1
1.1. Introduction .....	1
1.2. Problématique.....	3
1.3. Objectifs .....	5
1.4. Méthodologie.....	6
1.5. Originalité.....	9
CHAPITRE 2.....	10
REVUE DE LITTÉRATURE .....	10
Introduction .....	10
2.1. Méthodes de texturation de surfaces.....	10
2.1.1 Ablation par laser.....	10
2.1.2 Usinage par machine à commande numérique .....	11
2.1.3 Machine à décharge électrique .....	11
2.1.4 Lithographie .....	12
2.1.5 Impression 3D .....	12
2.2. Mouillabilité et superhydrophobicité.....	13
2.3. Transition de mouillage.....	14
2.4. Diamètre d'épandage maximal .....	16
2.5. Critères d'optimisation de topographie de structure pour un régime de Cassie-Baxter .....	17
2.5.1. Optimisation de la distance de l'extrémité à l'extrémité et de la hauteur du pilier .....	17
2.5.2. Bilan d'énergie de la gouttelette d'eau se heurtant sur une surface micro-structurée .....	18

2.6. Définition du comportement de la gouttelette d'eau .....	20
2.7. Recherches antérieures sur l'impact de la gouttelette d'eau sur les surfaces micro-structurées.....	21
Conclusion.....	26
<b>MATÉRIELS ET MÉTHODES .....</b>	<b>27</b>
Méthodologie.....	27
3.1. Préparation des micro-trous.....	27
3.1.1. La conception des prototypes des micro-trous .....	28
3.1.2. La gravure des micro-structures .....	29
3.2. Réplication de micro-structures avec moulage par compression.....	29
3.2.1. Préparation de matériel moulé.....	30
3.2.2. Chauffage et moulage.....	30
3.2.3. Démoulage et refroidissement.....	31
3.3. Caractérisation de la surface.....	32
3.4. Étude du comportement de la gouttelette d'eau .....	35
<b>CHAPITRE 4.....</b>	<b>38</b>
<b>RÉALISATION DES SURFACES MICRO-STRUCTURÉES.....</b>	<b>38</b>
Réalisation des surfaces micro-structurées.....	38
4.1. Réalisation des micro-trous .....	38
4.2. Moulage par compression.....	43
4.3. Étude de la mouillabilité de la surface.....	49
Conclusion.....	53
<b>CHAPITRE 5.....</b>	<b>54</b>
<b>ÉTUDE DU COMPORTEMENT DE LA GOUTTELETTE D'EAU .....</b>	<b>54</b>
Introduction .....	54
5.1. Calcul de la vitesse de l'impact .....	56
5.2. Étude du comportement de la gouttelette d'eau sur les surfaces micro-structurées .....	56
5.2.1. Comportement de la gouttelette d'eau pour un volume de 10 $\mu$ l .....	56
5.2.1.1. Comportement de la gouttelette d'eau sur les surfaces superhydrophobes .....	57
5.2.1.2. Comportement de la gouttelette d'eau sur les surfaces hydrophobes .....	57
5.2.1.2.1. Effet de la hauteur des piliers de 70 $\mu$ m .....	57
5.2.1.2.2. Effet de la hauteur des piliers de 90 $\mu$ m .....	58
5.2.1.2.3. Effet de la hauteur des piliers de 140 $\mu$ m .....	58
5.2.1.2.4. Effet de la topographie de micro-structure .....	62
5.2.1.2.5. Effet du substrat.....	63
5.2.2. Comportement de la gouttelette d'eau pour un volume de 20 $\mu$ l .....	63

5.2.2.1. Comportement de la gouttelette d'eau sur les surfaces superhydrophobes .....	64
5.2.2.2. Comportement de la gouttelette d'eau sur les surfaces hydrophobes .....	64
5.2.2.2.1. Effet de la hauteur des piliers de 70 $\mu\text{m}$ .....	64
5.2.2.2.2. Effet de la hauteur des piliers de 90 $\mu\text{m}$ .....	65
5.2.2.2.3. Effet de la hauteur des piliers de 140 $\mu\text{m}$ .....	65
5.2.2.2.4. Effet de la taille de la gouttelette .....	68
5.3. Paramètre d'épandage maximal ( $\beta$ ) .....	68
5.4. Prédiction de régime de mouillage basant sur la balance des pressions $P_{wh}$ et $P_L$ .....	69
Conclusion .....	70
CHAPITRE 6 .....	71
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....	71
Références .....	75
Annexe .....	80

## Liste des figures

Figure 1. 1: Conséquences de la tempête sur les infrastructures, lignes électriques et vie urbaine [26]. .....	5
Figure 1. 2: Organigramme de la méthodologie pour étudier le comportement de la gouttelette d'eau sur les surfaces micro-structurées. ....	8
Figure 2. 1: Différentes techniques de texturation de surface [18].....	13
Figure 2. 2: Différents régimes de mouillabilité de surface (a) Mode de contact de Young sur une surface plane. (b) Mode Wenzel sur une surface rugueuse. (c) Mode Cassie-Baxter sur une surface rugueuse avec piégeage d'air [42]. .....	14
Figure 2. 3: Mécanisme de transition de mouillage [43]. .....	15
Figure 2. 4: État non-mouillé vis-à-vis aux pressions $P_L$ et $P_{wh}$ [43].....	16
Figure 2. 5: Études antérieures sur l'effet de $(\beta)$ sur le nombre de $We$ [46]. .....	17
Figure 2. 6: Schéma de différentes énergies avant (a) et après (b) l'impact de gouttelette d'eau sur une surface micro-nano structurée.....	19
Figure 3. 1: Représentation schématique de gravure.....	29
Figure 3. 2: Processus de chauffage et de moulage [14]. .....	30
Figure 3. 3: Processus de chauffage et de démoulage [14].....	31
Figure 3. 4: Schéma d'une micro-structure après le moulage par compression. ....	31
Figure 3. 5: Mesure de l'angle de contact Kruss <sup>TM</sup> DSA100. ....	32
Figure 3. 6: Angle de contact d'une gouttelette (2,67 mm de diamètre) déposée sur une surface micro-structurée. ....	33
Figure 3. 7: Mesure de CAH sur logiciel ImageJ. ....	34
Figure 3. 8: Image MEB de la micro-structure de l'aluminium. ....	35
Figure 3. 9: Montage expérimental pour étudier le comportement des gouttelettes d'eau sur de différentes surfaces développées. ....	37
Figure 4. 1: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 50,9 $\mu\text{m}$ . .....	40
Figure 4. 2: Image microscope optique (100X) des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 122 $\mu\text{m}$ ....	40
Figure 4. 3: Image microscope optique (100X) des trous réalisés sur de l'aluminium avec l'épaisseur de 80 $\mu\text{m}$ pour un diamètre de 100 $\mu\text{m}$ . ....	41
Figure 4. 4: Images microscopes optique (100X) des trous réalisés sur de l'aluminium avec l'épaisseur de 80 $\mu\text{m}$ pour un diamètre de 75 $\mu\text{m}$ . ....	42
Figure 4. 5: Image des micro-structures répliqués obtenue à l'aide du microscope optique (magnification 100X, vue de haut). ....	44
Figure 4. 6: Image des micro-structures répliqués obtenue à l'aide du microscope optique (magnification 100X, vue de haut). ....	44
Figure 4. 7: Image MEB de hauteur du pilier du Kapton (50,9 $\mu\text{m}$ ) et $d= 100 \mu\text{m}$ , $S= 300\pm 2 \mu\text{m}$ , (a) : vue de face (magnification 100X) et (b) : vue de face (magnification 500X). ....	45
Figure 4. 8: Image MEB de hauteur du pilier du Kapton (122 $\mu\text{m}$ ) et $d= 100 \mu\text{m}$ et $S=150\pm 4 \mu\text{m}$ (a) : vue de face (magnification 100X) et (b): vue de face (magnification 500X). ....	45
Figure 4. 9: Image MEB de hauteur du pilier du Kapton (122 $\mu\text{m}$ ) et $d= 100 \mu\text{m}$ , $S= 175\pm 3 \mu\text{m}$ , (a) : vue de face (magnification 100X) et (b) : vue de face (magnification 500X). ....	46
Figure 4. 10 : Image MEB de hauteur du pilier du Kapton (122 $\mu\text{m}$ ) et $d= 100 \mu\text{m}$ , $S= 200\pm 3 \mu\text{m}$ , (a) : vue de face (magnification 100X) et (b) : vue de face (magnification 500X). ....	46
Figure 4. 11: Effet des paramètres du pilier sur l'CA et CAH pour les gouttelettes d'eau, avec $V=20 \mu\text{l}$ et $d=100 \mu\text{m}$ .....	46

Figure 4. 12: Image MEB de hauteur du pilier du Kapton (122 $\mu\text{m}$ ) et $d= 100 \mu\text{m}$ , $S= 250\pm3 \mu\text{m}$ , (a) : vue de face (magnification 100X) et (b) : vue de face (magnification 500X) .....	47
Figure 4. 13: Image MEB de hauteur du pilier d'aluminium (80 $\mu\text{m}$ ) et $d= 75 \mu\text{m}$ et $S= 175\pm3 \mu\text{m}$ (a) : vue de face (magnification 100X) et (b) : vue de face (magnification 500X) .....	48
Figure 4. 14: Image MEB de hauteur du pilier du Kapton (122 $\mu\text{m}$ ) et $d= 100 \mu\text{m}$ , $S= 125\pm3 \mu\text{m}$ , (a) : vue de face (magnification 100X) et (b) : vue de face (magnification 500X) .....	48
Figure 4. 15: Effet des paramètres du pilier sur l'CA et CAH pour les gouttelettes d'eau, $d= 100 \mu\text{m}$ .....	53
Figure 4. 16: Effet des paramètres du pilier sur l'CA et CAH pour les gouttelettes d'eau Avec $V=20 \mu\text{l}$ et $d=75 \mu\text{m}$ .....	53
Figure 4. 17: Effet des paramètres du pilier sur l'CA et CAH pour les gouttelettes d'eau, avec $V=10 \mu\text{l}$ et $d=100 \mu\text{m}$ .....	53
Figure 4. 18: Effet des paramètres du pilier sur l'CA et CAH pour les gouttelettes d'eau, avec $V=20 \mu\text{l}$ et $d=100 \mu\text{m}$ .....	53
Figure 5. 1: Images de différents comportements de la gouttelette d'eau pour une surface micro-structurée pour un volume de gouttelette de 10 $\mu\text{l}$ .....	55
Figure 5. 2: Effet de (S) sur le comportement de gouttelette d'eau pour $V= 10 \mu\text{l}$ et $d= 75 \mu\text{m}$ .....	59
Figure 5. 3: Variation de Re en fonction de We pour la micro-structure ayant : $d= 78\pm4 \mu\text{m}$ , $S= 125\pm2$ et $150\pm2 \mu\text{m}$ et $h= 90\pm3 \mu\text{m}$ .....	60
Figure 5. 4: Effet de (S) sur le comportement des gouttelettes d'eau pour $V= 10 \mu\text{l}$ et $d= 100 \mu\text{m}$ pour hauteur des piliers de 70 $\mu\text{m}$ .....	60
Figure 5. 5: Effet de (S) sur le comportement des gouttelettes d'eau pour $V= 10 \mu\text{l}$ et $d= 100 \mu\text{m}$ pour hauteur des piliers de 90 $\mu\text{m}$ .....	61
Figure 5. 6: Effet de (S) sur le comportement des gouttelettes d'eau pour $V= 10 \mu\text{l}$ et $d= 100 \mu\text{m}$ pour hauteur des piliers de 140 $\mu\text{m}$ .....	61
Figure 5. 7: Périmètre ondulé pour un nombre de We de 132 et un (S) de 200 $\mu\text{m}$ .....	63
Figure 5. 8: Effet de (S) sur le comportement de gouttelette d'eau pour $V= 20 \mu\text{l}$ et $d= 75 \mu\text{m}$ .....	66
Figure 5. 9: Effet de (S) sur le comportement des gouttelettes d'eau pour $V= 20 \mu\text{l}$ et $d= 100 \mu\text{m}$ pour hauteur des piliers de 70 $\mu\text{m}$ .....	66
Figure 5. 10: Effet de (S) sur le comportement des gouttelettes d'eau pour $V= 10 \mu\text{l}$ et $d= 100 \mu\text{m}$ pour hauteur des piliers de 90 $\mu\text{m}$ .....	67
Figure 5. 11: Effet de (S) sur le comportement des gouttelettes d'eau pour $V= 20 \mu\text{l}$ et $d= 100 \mu\text{m}$ pour hauteur des piliers de 140 $\mu\text{m}$ .....	67
Figure 5. 12: Effet de la topographie de surface sur ( $\beta$ ) pour un volume de gouttelette de 10 $\mu\text{l}$ .....	69
Figure 5. 13: Effet de la topographie de surface sur ( $\beta$ ) .....	69
A.III. 1: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 50,9 $\mu\text{m}$ avec un $S= 300\pm2 \mu\text{m}$ .....	80
A.III. 2: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 50,9 $\mu\text{m}$ avec un $S= 275\pm3 \mu\text{m}$ .....	81
A.III. 3: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 50,9 $\mu\text{m}$ avec un $S= 250\pm3 \mu\text{m}$ .....	81
A.III. 4: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 50,9 $\mu\text{m}$ avec un $S= 225\pm2 \mu\text{m}$ .....	82
A.III. 5: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 50,9 $\mu\text{m}$ avec un $S= 200\pm4 \mu\text{m}$ .....	82
A.III. 6: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 50,9 $\mu\text{m}$ avec un $S= 150\pm4 \mu\text{m}$ .....	83
A.III. 7: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 50,9 $\mu\text{m}$ avec un $S= 125\pm3 \mu\text{m}$ .....	83
A.III. 8: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 122 $\mu\text{m}$ avec un $S= 300\pm1 \mu\text{m}$ .....	84
A.III. 9: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 122 $\mu\text{m}$ avec un $S= 275\pm5 \mu\text{m}$ .....	84

A.III. 10: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 122 $\mu\text{m}$ avec un $S= 250\pm3 \mu\text{m}$ .....	85
A.III. 11: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 122 $\mu\text{m}$ avec un $S= 225\pm2 \mu\text{m}$ .....	85
A.III. 12: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 122 $\mu\text{m}$ avec un $S= 200\pm2 \mu\text{m}$ .....	86
A.III. 13: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 122 $\mu\text{m}$ avec un $S= 150\pm4 \mu\text{m}$ .....	86
A.III. 14: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Aluminium avec l'épaisseur de 80 $\mu\text{m}$ avec un $S= 305\pm3 \mu\text{m}$ .....	87
A.III. 15: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Aluminium avec l'épaisseur de 80 $\mu\text{m}$ avec un $S= 275\pm4 \mu\text{m}$ .....	87
A.III. 16: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Aluminium avec l'épaisseur de 80 $\mu\text{m}$ avec un $S= 250\pm3 \mu\text{m}$ .....	88
A.III. 17: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Aluminium avec l'épaisseur de 80 $\mu\text{m}$ avec un $S= 225\pm2 \mu\text{m}$ .....	88
A.III. 18: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Aluminium avec l'épaisseur de 80 $\mu\text{m}$ avec un $S= 200\pm5 \mu\text{m}$ .....	89
A.III. 19: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Aluminium avec l'épaisseur de 80 $\mu\text{m}$ avec un $S= 150\pm3 \mu\text{m}$ .....	89
A.V.1. 1. Profil de la vitesse d'impact de la gouttelette d'eau impactant sur une surface.....	90

## **Liste des équations**

Équation 2. 1.....	13
Équation 2. 2.....	14
Équation 2. 3.....	14
Équation 2. 4.....	16
Équation 2. 5.....	16
Équation 2. 6.....	16
Équation 2. 7.....	18
Équation 2. 8.....	18
Équation 2. 9.....	18
Équation 2. 10.....	19
Équation 2. 11.....	20
Équation 2. 12.....	20
Équation 3. 1.....	33
Équation 5. 1.....	56

## **Liste des tableaux**

Tableau 2. 1: Résumé des expériences antérieures sur l'impact de la gouttelette d'eau sur les surfaces micro-structurées.....	25
Tableau 3. 1: Conditions de géométrie de création des micro-structures.....	28
Tableau 3. 2 : Défis et solutions rencontrés pendant la réalisation du projet de recherche .....	30
Tableau 3. 3: Conditions expérimentales de moulage par compression.....	36
Tableau 4. 1: Conditions expérimentales pour la création des micro-trous pour un diamètre de 100 $\mu\text{m}$ . .....	39
Tableau 4. 2: Conditions expérimentales pour la création des micro-trous pour un diamètre de 75 $\mu\text{m}$ . .....	39
Tableau 4. 3: Valeurs des angles de contact théoriques et les régimes théoriques et expérimentaux. .....	50

## Sigles

Sigle	Signification
<b>CA</b>	Angle de contact [°]
<b>CAH</b>	Hystérésis de l'angle de contact [°]
$\beta$	Paramètre d'épandage maximal
$CA_R$	Angle de contact de recul [°]
$CA_A$ et $\theta_A$	Angle de contact d'avancé [°]
$\theta_{CB}$	Angle de contact de Cassie-Baxter [°]
$\rho$	Densité de l'eau $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
$C$	Vitesse de son $\left[\frac{m}{s}\right]$
$v_i$	Vitesse d'impact de gouttelette $\left[\frac{m}{s}\right]$
$v_s$	Vitesse de diffusion de gouttelette $\left[\frac{m}{s}\right]$
$\mu$	Viscosité $[Pa.s]$
$\sigma$	Tension de la surface $\left[\frac{N}{m}\right]$
$\gamma_{SL}$	Tensions d'interface du solide / liquide $\left[\frac{N}{m}\right]$
$\gamma_{LV}$	Tensions d'interface du liquide / vapeur $\left[\frac{N}{m}\right]$
$\gamma_{SV}$	Tensions d'interface du solide / vapeur $\left[\frac{N}{m}\right]$
$f_s$	Fraction de surface solide
$D$	Diamètre de gouttelette [ $\mu m$ ]
<b>ICP</b>	Plasma à couplage inductif (méthode de gravure)
$e$	Épaisseur du substrat
$d$	Diamètre de micro-structure [ $\mu m$ ]
$h$	Hauteur de micro-structure [ $\mu m$ ]
$S$	Espacement centre à centre du pilier [ $\mu m$ ]
$b$	Distance extrémité à extrémité du pilier [ $\mu m$ ]
$t$	Temps de dissipation [s]
$V$	Volume de la gouttelette [ $m^3$ ]
$E_{c_1}$ et $E_{c_2}$	Énergie cinétique avant et après l'impact respectivement [J]
$E_{s_1}$ et $E_{s_2}$	Énergie de surface avant et après l'impact respectivement [J]
$E_d$	Énergie de dissipation après l'impact [J]
$\emptyset$	Valeur de dissipation
<b>K, F et <math>A_1</math></b>	Fonction

## Nomenclatures

Nomenclature	Signification
<b>EPDM</b>	Ethylène propylène diène-diènes monomère (Polymère)
<b>CNC</b>	Machine à commande numérique
<b>EDM</b>	Electrical discharge machining
<b>PMMA</b>	Polyméthacrylate de méthyle
<b>PDMS</b>	Polydiméthylsiloxane
<b>PS</b>	Polystyrène
<b>PFTS</b>	Perfluorodécyltrichlorosilane
<b>UV</b>	Ultraviolet (Rayonnement)
<b>Al</b>	Aluminium
<b>We</b>	Nombre de Weber
<b>Re</b>	Nombre de Reynolds
<b>RC</b>	Rebondissement complet
<b>RP</b>	Rebondissement partiel
<b>JS</b>	Jet singulier
<b>D</b>	Déposition
<b>ÉR</b>	Éclaboussure rapide
<b>RDR</b>	Récession de rupture

# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

### 1.1. Introduction

L'étude de l'impact dynamique de liquide sur une surface solide a été examinée pour la première fois par Worthington [1]. Cette étude est un élément clé d'une grande variété de phénomènes rencontrés dans les applications industrielles, tels que : le givrage sur les ailes des avions, l'impression jet d'encre, le refroidissement par pulvérisation des surfaces chaudes (puces à semi-conducteurs, appareils électroniques ainsi que l'érosion des aubes de turbine), le refroidissement des alliages comme l'aluminium et l'acier, l'extinction des incendies en utilisant le gicleur [2-4], l'injection du carburant liquide dans la chambre de combustion des moteurs à combustion interne, etc [5]. L'impact de la gouttelette d'eau joue un rôle primordial dans les différentes applications mentionnées ci-dessus où les caractéristiques de la gouttelette peuvent varier considérablement, tels que sa taille et sa vitesse d'impact. Au cours des dernières années, certains groupes de recherche ont commencé à explorer l'impact des gouttelettes d'eau sur les surfaces superhydrophobes [5,6]. Plusieurs paramètres expérimentaux affectent la dynamique de l'impact, tels que : la mouillabilité, la rugosité, la vitesse de l'impact, la tension superficielle, la densité du liquide ainsi que la viscosité [1]. La surface superhydrophobe est une surface qui possède un angle de contact de plus de  $150^\circ$ , avec une hystérésis de l'angle de contact (CAH  $<10^\circ$ ) et une faible énergie de surface, elle représente la propriété d'auto-nettoyage [1, 6-8]. Ce genre de surfaces peuvent repousser les gouttelettes d'eau dans des conditions de givrage [9]. Une mobilité élevée et un rebondissement des gouttelettes d'eau ont été aperçus après quelques millisecondes pour ce genre de surfaces [1,10]. En outre, la déperlançage empêche la formation de la glace sans exercer aucune force externe, ce qui offre de nombreux avantages pour réduire le givrage sur les surfaces exposées [11-13].

Certains exemples de surfaces possèdent naturellement la propriété de la superhydrophobicité comme : les feuilles de lotus, les ailes de papillon, les ailes de cigale et les yeux de moustique [1]. Alors, pour avoir des surfaces superhydrophobes, ces surfaces naturelles pourraient être imitées par la réalisation des micro-nano structures avec une faible énergie de surface afin d'empêcher la

pénétration de la gouttelette d'eau entre les piliers de surface micro-nano structurée (état de Cassie-Baxter). Il est connu que les micro-nano structures hiérarchiques offrent les propriétés non mouillantes et hydrofuges les plus favorables [13,14]. La présence de ce genre de surfaces devient primordiale, lorsqu'elles permet d'éviter la pénétration de la gouttelette d'eau entre les piliers de la surface (état de Wenzel) et de réaliser l'état favorable de Cassie-Baxter. En effet, le nombre de Weber (We) qui compare l'énergie cinétique à l'énergie de surface, augmente en raison de l'effet substantiel des micro-structures pour empêcher le passage d'un état de Cassie-Baxter à un état de Wenzel [15]. La réalisation de ces surfaces est basée sur la création des motifs texturés qui présentent les mêmes propriétés géométriques avec les exemples réels ou concrets tels qu'illustrés ci-dessus. La réalisation de micro-nano structure fait appelle à plusieurs approches chimiques et/ou physiques pour atteindre la texture désirée. Dans la littérature, plusieurs méthodes conventionnelles ont été mentionnées, telles que : l'anodisation, la gravure, la lithographie, l'électrodéposition et des méthodes modernes comme les micromachines, l'ablation laser et la méthode d'impression 3D [16-18]. Ces techniques sont également utilisées afin d'améliorer la fonctionnalité de la surface de façon économique en termes d'énergie et de matière.

Comprendre le comportement statique et dynamique de la gouttelette d'eau sur les surfaces texturées est un défi scientifique. Approfondir cette compréhension pourrait offrir des solutions potentielles dans de nombreux domaines où la prédiction et/ou le contrôle de la collecte d'eau due à l'impact des gouttelettes est nécessaire. Lors de l'impact de la gouttelette d'eau sur une surface solide, différents scénarios peuvent être obtenus tels que : le dépôt, le recul, les éclaboussures et le rebondissement. Ainsi, l'impact de la gouttelette d'eau sur une surface solide est affecté par plusieurs facteurs tels que : les propriétés des gouttelettes (la viscosité, la densité, la vitesse d'impact et la tension superficielle), les caractéristiques de la surface (la rugosité ou la texture de la surface) et les caractéristiques de l'environnement (l'humidité, la vitesse du vent ainsi que la température). Tous ces éléments pourraient d'ailleurs modifier les paramètres cinématiques et les caractéristiques de la surface [10]. L'effet de ces paramètres peut être évalué grâce à l'utilisation de plusieurs nombres adimensionnels qui représentent les grandeurs relatives des forces d'entraînement et de résistance pendant les processus d'étalement et de rétraction des gouttelettes, citant : le nombre de Reynolds, le nombre de Weber, le nombre capillaire ainsi que le nombre d'Ohnesorge [19,20].

L'étude de l'impact de la gouttelette d'eau est un élément clé pour évaluer son effet sur la formation de la glace. Également, la maîtrise de ce sujet peut offrir des solutions potentielles dans

différents domaines tels que : l'aérospatial, les câbles électriques et les tissus, etc [21]. Plusieurs tests ont été menés afin d'étudier le mécanisme de congélation de la gouttelette surfondue impactant une surface froide [22,23,24]. Une relation directe émerge entre le volume de la glace formé et la vitesse d'impact ainsi que la mouillabilité (angle de contact statique) [21].

Dans ce présent travail, l'impact de gouttelettes tombant sur une surface solide micro-structurée est étudié. Les gouttelettes pourraient se déposer, rebondir ou s'éclabousser sur la surface. Pour y parvenir, un matériau hydrophobe à base de silicium est utilisé tel que : le Polydiméthylsiloxane (PDMS). Plusieurs paramètres sont également étudiés pour mieux comprendre le comportement de la gouttelette d'eau et établir une corrélation entre les paramètres intrinsèques de la micro-goutte d'eau (diamètre et vitesse d'impact) et la morphologie de surface (tels que le diamètre, l'espacement centre à centre ainsi que la hauteur du pilier).

## **1.2. Problématique**

Le phénomène de givrage est bien connu surtout dans les régions à climat froid durant la période automne-hiver. Le glissement des automobiles est une conséquence de la présence du givre sur les vitres de voiture et aussi sur la chaussée. Cela est dû à la réduction du frottement entre les roues et la chaussée, conduisant alors à un manque de contrôle du véhicule qui amène ainsi à des actions inattendues [25-28].

En outre, le problème de givrage est également présent pour les aéronefs. Le givre a un effet négatif sur les propriétés aérodynamiques des surfaces de levage et même sur le fonctionnement des composants individuels tels que le réacteur. Au sol, les parties les plus sensibles de l'avion doivent être dégivrées avant le décollage. Le givre pourrait générer un atterrissage d'urgence en raison de l'augmentation des vibrations induites et des pertes de portance et la réduction de la puissance et même à l'arrêt du moteur [25]. Le givrage est également considéré comme une cause majeure de la défaillance des infrastructures dans la période automne-hiver à climat froid. Plusieurs catastrophes très graves ont été rencontrées, causées par l'accumulation du givre, notamment en hiver 1998, lorsqu'une grande partie de la côte est de l'Amérique du Nord y compris le sud du Québec, l'ouest du Nouveau-Brunswick, l'est de l'Ontario et le nord de New York ont subi une grave tempête de verglas conduisant à la mort de 35 personnes et des milliards de dollars de dommages aux niveaux des réseaux électriques, laissant ainsi la moitié de la population québécoise sans électricité de 3 à 30

jours (figure 1.1) [26-28]. L'adhérence des gouttelettes d'eau surfondue est donc à l'origine de plusieurs problèmes car elles changent les caractéristiques des surfaces sur lesquelles elles se déposent (givre, isolation, poids etc). Les surfaces superhydrophobes pourraient limiter cette adhérence.

Ce travail présente l'étude fondamentale des gouttelettes impactant des surfaces micro-structurées afin de déterminer une corrélation entre les paramètres intrinsèques de la gouttelette et la morphologie de la surface.

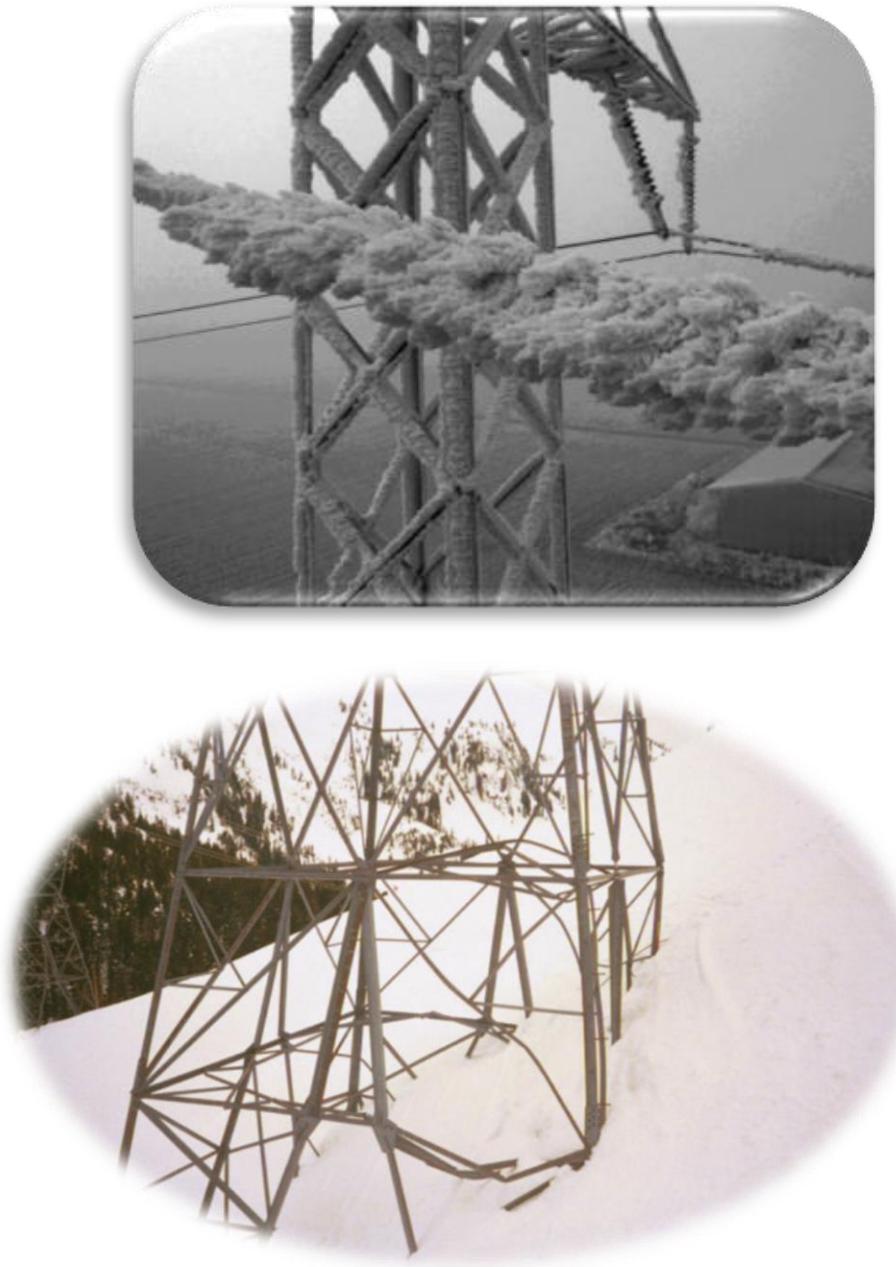


Figure 1. 1: Conséquences de la tempête sur les infrastructures, lignes électriques et vie urbaine [26].

### 1.3. Objectifs

Le principal objectif de ce travail de recherche est d'étudier le comportement d'une gouttelette d'eau lors de la collision sur des surfaces micro-structurées. Une approche physique est adoptée pour créer la micro-structure en la gravant avec la machine à commande numérique (CNC) sur un substrat de polymère ou un métal (aluminium). La texture est ensuite formée et répliquée sur un matériau élastique type PDMS par une technique de compression.

L'étude du comportement dynamique de la gouttelette d'eau se fait grâce à une caméra à haute vitesse, qui servira pour une étude approfondie du phénomène de rebondissement de la micro-goutte sur la surface obtenue. A ce niveau, il est primordial de noter que la micro-structure est tributaire de la nature du substrat et de la technique de gravure. Afin de réaliser ce projet, les objectifs spécifiques suivants ont été fixés :

- Étude de faisabilité de la fabrication de petites micro-structures à l'aide d'une machine CNC.
- Etude de faisabilité de la réplication de micro-structures produits sur PDMS en utilisant un système de moulage par compression.
- Étude de l'effet des dimensions des micro-structures, tels que : le diamètre, la hauteur ainsi que l'espacement centre à centre du pilier sur le comportement des gouttelettes d'eau.
- Étude de l'impact de gouttelette d'eau sur les surfaces produites.

#### **1.4. Méthodologie**

La méthode adoptée pour ce travail est divisée en quatre parties essentielles : la recherche bibliographique, la fabrication des surfaces micro-structurées, la caractérisation de ces surfaces ainsi que l'étude du comportement de gouttelettes d'eau lors de leur impact sur les surfaces créées. Pour la revue de littérature, les recherches sont basées sur les aspects suivants :

- Méthodes de texturation de surface.
- Bilan de l'énergie de la gouttelette d'eau se heurtant sur une surface micro-structurée.
- Effet de la topographie de micro-structure et le volume de gouttelette sur le comportement dynamique de gouttelette d'eau.

Une fois la littérature complétée, les micro-structures sont fabriquées suivant deux étapes :

- La fabrication des micro-trous avec une machine CNC.
- La réplication des micro-trous afin d'avoir des surfaces micro-structurées.

Une fois cette étape achevée, la caractérisation de surface est effectuée de la façon suivante :

- Mesure de l'angle de contact (CA).
- Mesure de l'hystérésis d'angle de contact (CAH).
- Vérification de topographie de la micro-structure avec le microscope à balayage (MEB) ainsi que le microscope optique.

Finalement, le comportement de gouttelette d'eau sur des surfaces micro-structurées ainsi créées est étudié en variant les trois paramètres suivants : la vitesse d'impact, la taille de la gouttelette d'eau (le diamètre D) et les caractéristiques de micro-structure (la vitesse de l'impact de la gouttelette  $v_i$  0,25-2,5  $\frac{m}{s}$ , diamètre du pilier d 75 et 100  $\mu m$ , l'espacement centre à centre du pilier S 100,125,... 300  $\mu m$  avec un pas de 25  $\mu m$  et la hauteur du pilier h 70, 90 et 140  $\mu m$ ).

La rédaction du mémoire est divisée en six chapitres. Tout d'abord, le premier chapitre présente l'introduction du projet de recherche, la problématique, les objectifs, la méthodologie utilisée ainsi que l'originalité du projet de recherche.

Le deuxième chapitre se consacre à la revue de littérature. Il débute par les différentes méthodes de texturation de surface (CNC, ablation au laser, EDM etc..), étant suivi par la définition de mouillabilité et hydrophobicité, le bilan d'énergie ainsi que les études sur l'effet de la topographie de micro-structure et le volume de gouttelette sur le comportement dynamique de gouttelette d'eau.

Le troisième chapitre décrit les matériels et méthodes pour réaliser ce projet.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats de la fabrication des surfaces micro-structurées ainsi que la caractérisation de surface (CA, CAH et MEB).

Le cinquième chapitre est le cœur des résultats dédié à la présentation des comportements de gouttelette d'eau sur les surfaces micro-structurées en utilisant un camera haute vitesse, incluant la variation de la vitesse d'impact ( $v_i$ ), la taille de gouttelette (D) ainsi que la topographie de micro-structure (d, S et h).

Le dernier chapitre présente les conclusions générales ainsi que les recommandations sur les travaux futurs.

La figure 1.2, présente la méthodologie suivie dans ce sujet de recherche.

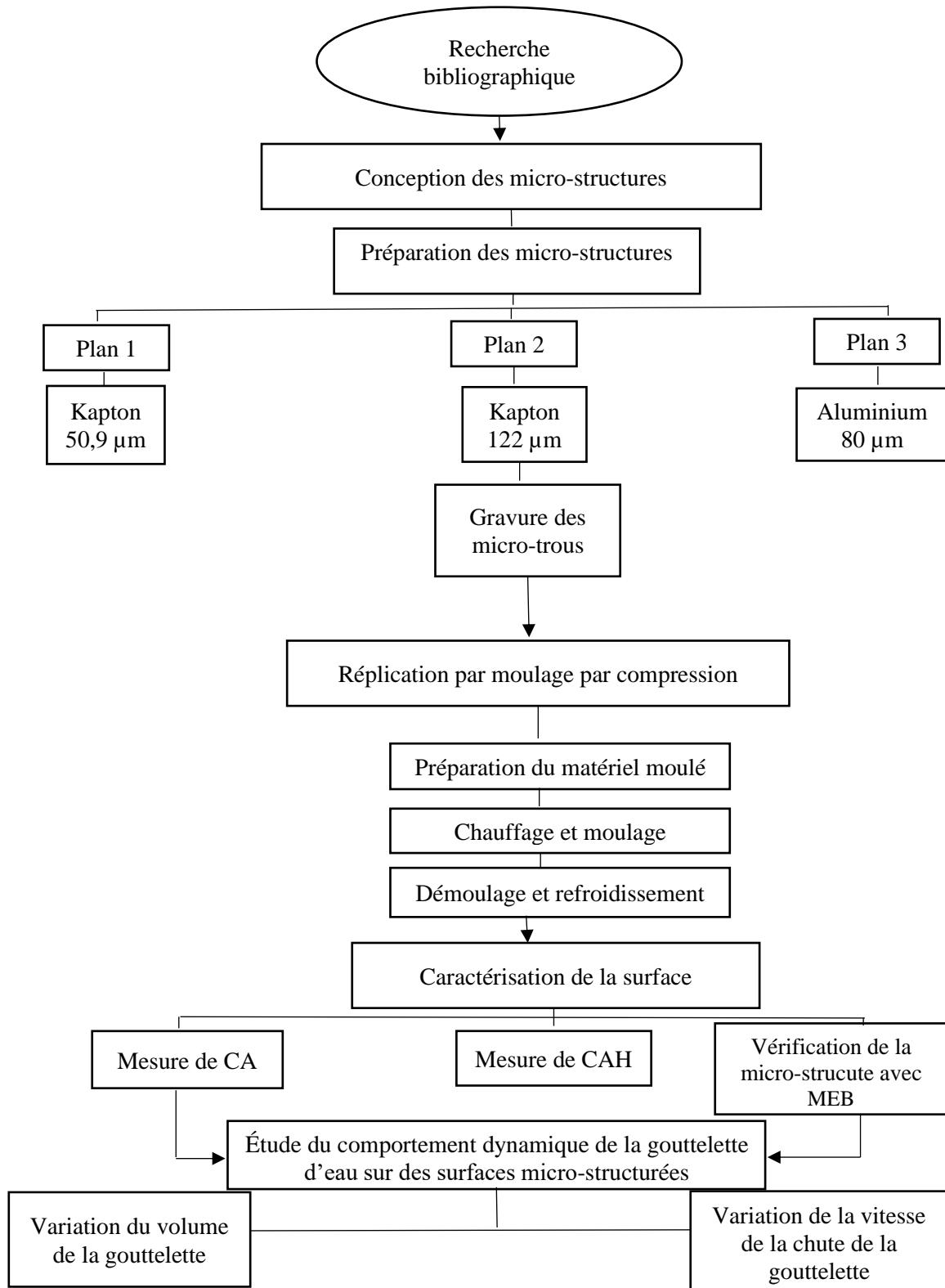


Figure 1. 2: Organigramme de la méthodologie pour étudier le comportement de la gouttelette d'eau sur les surfaces micro-structurées.

## 1.5. Originalité

L'originalité de ce travail se résume dans le fait que cette étude présente des nouveautés à propos :

- Des développements de micro-structures, ordonnées et homogènes en utilisant une technique industrielle (CNC).
- De l'étude de différents paramètres opératoires de réplication des micro-structures sur le PDMS ainsi que les effets des paramètres de micro-structures ( $d$ ,  $S$  et  $h$ ) sur le comportement de la gouttelette d'eau.
- De l'étude du comportement dynamique des gouttelettes d'eau sur les micro-structures ordonnées à base de PDMS en modifiant simultanément trois paramètres : la vitesse d'impact, le diamètre de la gouttelette ainsi que la topographie de micro-structures ( $v_i$ ,  $d$ ,  $S$  et  $h$ ).

## CHAPITRE 2

### REVUE DE LITTÉRATURE

#### Introduction

Ce chapitre présente les différentes techniques de la texturation de surfaces et dévoile leurs effets sur la mouillabilité et superhydrophobicité. Pour approfondir la compréhension de ce sujet, la transition de mouillage et le diamètre de d'épandage maximal de la gouttelette seront étudier. Également, Le bilan d'énergie sera présenté ainsi que les recherches effectuées pour examiner le comportement de la gouttelette d'eau impactant des surfaces structurées.

Plusieurs méthodes de texturation de surfaces sont disponibles et présentées comme suit:

#### 2.1. Méthodes de texturation de surfaces

Dans la littérature, plusieurs méthodes de texturation de surfaces sont disponibles comme suit :

##### 2.1.1 Ablation par laser

L'ablation par laser est une technique qui sert à produire des motifs structurés [16]. Cette méthode consiste à faire des cratères à l'aide d'un laser grâce à l'interaction faisceau laser-matière (substrat). Par la transformation de l'énergie absorbée en chaleur ensuite dissipée dans le matériau par conduction thermique conduisant à une fusion locale. Dans certains cas, le phénomène de combustion lié à un apport d'oxygène aide le processus par la réduction de la viscosité et des tensions superficielles du métal liquide. En conséquence, deux différents phénomènes sont présents lors de l'ablation par laser : le traitement pyrolytique et le traitement photo-lithique. Le traitement pyrolytique consiste à chauffer et à fondre le substrat (matériau), alors que le traitement photo lithique est basé sur la rupture directe des liaisons chimiques dans une large gamme de matériaux. En fait, le traitement photo-lithique sert à enlever de la matière en brisant les liaisons atomiques. Ce phénomène décrit comme : des photons ou des paquets d'énergie, qui ont une longueur d'onde et une fréquence. L'énergie optique est transférée aux électrons par absorption, ce qui accroît essentiellement l'énergie des électrons en augmentant la vibration des électrons qui est détectée sous forme de chaleur. [18,29]. M.H. Chon et al. [30], ont utilisé l'ablation par laser pour produire des micro-trous à base de polyoxyméthylène afin d'étudier l'effet de la texturation de la surface sur le frottement du substrat. Les trous réalisés ont un diamètre de 125  $\mu\text{m}$  et une profondeur de 125  $\mu\text{m}$ . Les résultats ont montré que cette méthode provoque des dommages au niveau des matériaux polymériques

(polyoxyméthylène) à cause de la fusion thermique pendant l’interaction de laser-substrat. Il est bien noté que le coefficient de frottement est diminué (50%) pour une surface micro-structurée de polyoxométhylène. Ce résultat peut montrer l’effet de la texturation de la surface.

### **2.1.2 Usinage par machine à commande numérique**

L’usinage par la machine à commande numérique est une technique qui sert à créer des micro-trous par la technique de gravure assistée par la machine à commande numérique CNC à l’aide d’un foret [18]. Des recherches récentes ont été faites pour constater l’effet des micro-structures sur la mouillabilité et le coefficient de friction. Roy et al., ont constaté que les surfaces texturées à base de micro-trous de Ti 6Al-4V ( $d = 122, 177$  et  $194 \mu\text{m}$ ,  $S \approx 299 \mu\text{m}$  et  $h \approx 20 \mu\text{m}$ ) minimisent considérablement le coefficient de friction et la mouillabilité en raison de la faible surface de contact entre la gouttelette et la micro-structure (liquide-solide) dans ce genre de design des micro-structures (micro-structures cylindriques) [31]. Également, Qin et al., ont observé que la surface à arrangement cylindrique offrait une mouillabilité stable (évolution de l’angle de contact en fonction de temps) avec un coefficient de friction faible ou minimum par rapport à celles des surfaces carrées et triangulaires car sa structure pourrait emprisonner les particules d’usure et minimiser l’abrasion du corps [32].

### **2.1.3 Machine à décharge électrique**

L’usinage par décharge électrique appelé aussi érosion par étincelle, est un processus thermique qui utilise une décharge par étincelle pour faire fondre ou éliminer un matériau conducteur [33], afin de produire des trous et d’autres formes au besoin soit simples ou complexes. La méthode consiste à appliquer une décharge électrique pulsatrice à haute fréquence qui provoque une augmentation locale de la température qui peut arriver à une valeur très haute, au-delà de la température de fusion du matériau utilisé. Les trous développés sont de l’ordre du micromètre avec une bonne répétabilité (diamètres sont de 50 et 90  $\mu\text{m}$ ). La même méthode a servi pour le développement des surfaces superhydrophobes sur un substrat d’aluminium. La surface d’aluminium 5083 a été rendue superhydrophobe avec un angle de contact de 158° après la création des rainures rectangulaires submillimétriques sur la feuille de riz [34].

#### 2.1.4 Lithographie

La lithographie est une technique qui permet de synthétiser des surfaces adaptées et semblables au dessin ou motif désiré. Grâce à un rayonnement ultraviolet, rayons X ou encore un faisceau électronique, suivant l'exposition à l'irradiation à travers un masque, la couche de polymère laissera une image positive ou négative [35]. Une étude a été réalisée par Jung et Bhushan dans l'intention d'examiner le comportement de la gouttelette d'eau sur deux types de polymères : le polyméthacrylate de méthyle (PMMA) et le polystyrène (PS) [36]. Thi Phuong et al. ont réussi à créer des surfaces superhydrophobes, à partir des surfaces nano structurées à base de silicium. Pour se faire, des interfaces de silicium avec différentes morphologies de surface ont été étudiées. Ces surfaces structurées ont été traitées chimiquement avec du perfluorodecyl trichlorosilane (PFTS) [37]. Les résultats montrent que l'angle de contact est varié entre 150°-163° ainsi que l'hystérisé de l'angle de contact est supérieur à 20°.

#### 2.1.5 Impression 3D

Il existe plusieurs méthodes d'impression 3D dont la photopolymérisation. Cette technique se fait grâce à un appareil de stéréolithographie. Commercialisé en 1986, cette technique emploie une résine photosensible qui est exposée à une polymérisation localisée par exposition à un laser UV [38]. Zhoukun He et al. ont réussi à produire des surfaces superhydrophobes à base de Polydiméthylsiloxane (PDMS), avec un angle de contact de 155°. Ainsi, ils ont remarqué qu'il existe une relation inverse entre la vitesse d'impression et le diamètre de filament. De sorte que, quand les vitesses d'impression varient entre 0,75 à 6,00 mm/s, les diamètres de filaments diminuent de 0,37 à 0,19 mm. Cette relation inverse est due à l'augmentation du taux d'éirement des filaments PDMS causé par l'augmentation de la vitesse de translation de la buse [39]. La figure 2.1 présente les différentes techniques de texturation de surface ainsi que leurs applications respectives en fonction de la dimension de structure et la qualité de surface (Ra : la rugosité).

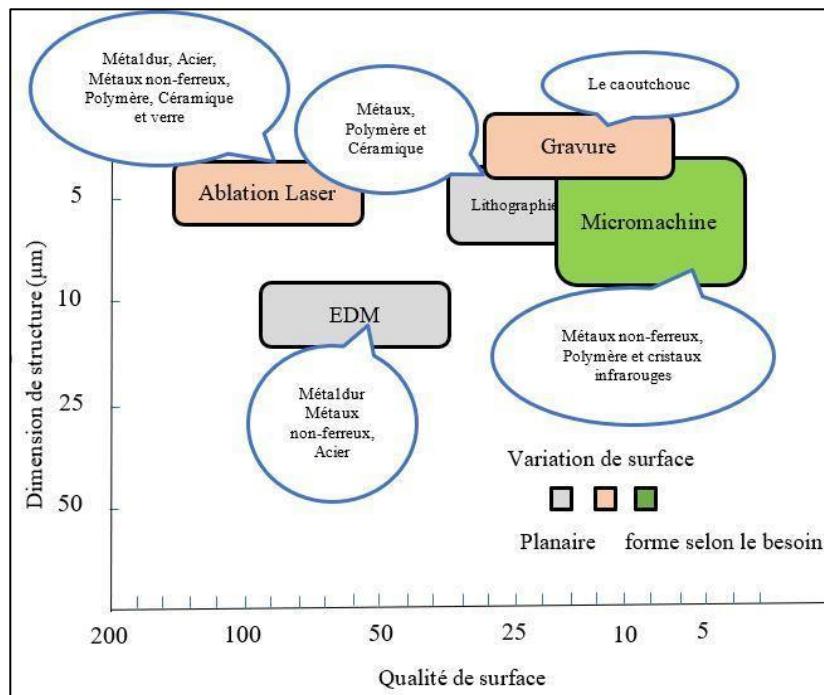


Figure 2. 1: Différentes techniques de texturation de surface [18].

## 2.2. Mouillabilité et superhydrophobicité

La mouillabilité de la surface est l'un des paramètres les plus influents lors de l'impact de gouttelettes sur des substrats solides. La mouillabilité est généralement spécifiée par l'angle de contact de la gouttelette d'eau sur la surface solide. Pour une surface idéalement plane, l'équation de Young décrit l'angle de contact statique (CA) par la tension de surface / interface (figure 2.2. a) [1, 40]:

$$\cos \theta_c = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad \text{Équation 2. 1}$$

Sachant que :  $\gamma_{SL}$ ,  $\gamma_{LV}$  et  $\gamma_{SV}$  sont : les tensions d'interface du solide / liquide, du liquide / vapeur et du solide / vapeur, respectivement.

Réellement, la surface solide est souvent rugueuse et pas parfaitement lisse. En outre, l'angle de contact de Young ne peut pas décrire l'angle de contact réel sur une surface rugueuse. Compte tenu de la rugosité de surface, il existe deux modèles courants pour décrire la relation entre la rugosité de surface et l'angle de contact : les modèles de Wenzel et de Cassie-Baxter [1, 40, 41]. Dans le modèle de Wenzel, on suppose qu'un liquide peut pénétrer complètement dans les structures de surface rugueuses (figure 2.2.b) [40] et son équation est la suivante :

$$\cos\theta_w = r\cos\theta_c$$

Équation 2. 2

Sachant que :  $r$  est la rugosité de la surface et  $\theta_w$  et  $\theta_c$  sont l'angle de contact de Wenzel et celui de Young respectivement. Selon cette équation, l'augmentation de la rugosité de surface conduit à augmenter le caractère hydrophile d'une surface hydrophile et l'hydrophobie d'une surface hydrophobe.

Le modèle de Cassie-Baxter suppose que le liquide est suspendu au-dessus de la rugosité de surface et ne mouille pas complètement la surface (figure.2.2.c) [40]. L'air emprisonné entre la gouttelette d'eau et le substrat conduit à un roulement plus facile de la gouttelette. L'angle de contact apparent dans le modèle de Cassie-Baxter peut s'exprimer comme suit :

$$\cos\theta_{CB} = f_s(1 + \cos\theta_c) - 1 \quad \text{Équation 2. 3}$$

Où  $f_s$  est une fraction de surface solide et  $\theta_{CB}$  l'angle de contact de Cassie-Baxter.

L'angle de contact dans l'état dynamique n'est pas identique à celui dans l'état statique. Dans le cas du déplacement de la gouttelette de liquide sur le substrat, l'angle de contact est appelé « l'angle de contact dynamique ». L'angle de contact pour une gouttelette avançant sur une surface est appelée l'angle d'avancé, alors que l'angle de contact de l'autre côté est l'angle de recul. La différence entre les angles de contact avant et arrière est l'hystérésis de l'angle de contact (CAH) [42].

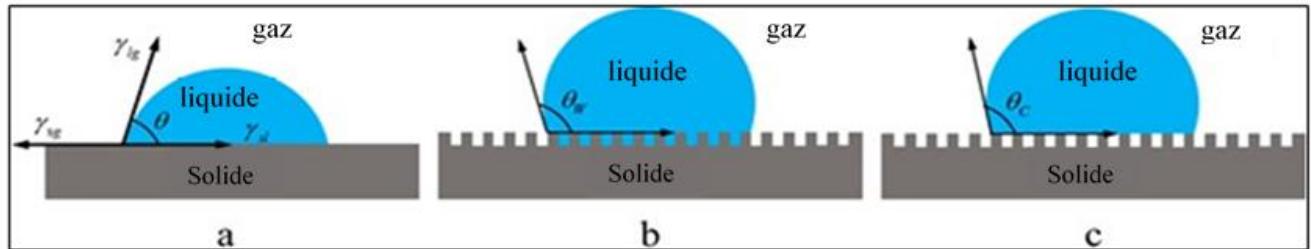


Figure 2. 2: Différents régimes de mouillabilité de surface (a) Mode de contact de Young sur une surface plane. (b) Mode Wenzel sur une surface rugueuse. (c) Mode Cassie-Baxter sur une surface rugueuse avec piégeage d'air [42].

### 2.3. Transition de mouillage

Sur une surface solide rugueuse, l'impact dynamique de gouttelette peut causer une transition de mouillage de l'état de Cassie-Baxter à l'état de Wenzel. Cette transition est indésirable dans le cas où la déperlançage (l'hydrofuge) de l'eau est demandée. La surface rugueuse pourrait perdre sa caractéristique d'hydrofuge dès qu'elle est mouillée, en raison de l'irréversibilité de la transition de l'état de Cassie-Baxter à l'état de Wenzel [41-43].

Dans l'état dynamique, la transition de l'état de Cassie-Baxter à l'état de Wenzel peut s'accomplir par affaissement (sagging) ou épinglage (de-pinning). Dans le premier, l'interface liquide-air reste épinglée à la surface supérieure des structures de surface. Cependant, au cours du temps la courbure de l'entrée liquide-air changera sous pression, jusqu'à ce qu'elle touche la base du substrat et que cela entraîne ainsi la transition du mouillage (2.3.a). Le mécanisme d'épinglage (2.3.b) est obtenu lorsque l'interface liquide-air ne reste pas épinglée à la surface supérieure des structures de surface. Cela peut provoquer la transition de mouillage [43]. La figure 2.3 présente le principe de deux mécanismes de transition de mouillage.

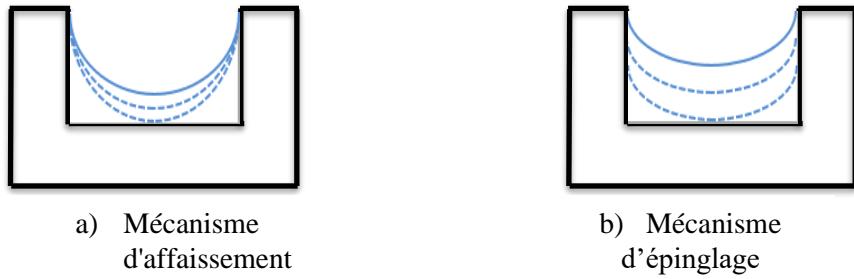


Figure 2. 3: Mécanisme de transition de mouillage [43].

L'impact de gouttelette d'eau sur une surface rugueuse est étroitement lié à deux pressions différentes : la pression de coup de bâlier (water hammer pressure) et la pression de Laplace. La pression de coup de bâlier ( $P_{wh}$ ) représente la pression de mouillage. En revanche, la pression de Laplace  $P_L$  définit la pression de non-mouillage grâce à la présence d'air à l'intérieur des cavités de surface. Alors, pour réaliser un état de Cassie-Baxter et éviter le mouillage de cavités de surface, il faut que  $P_L > P_{wh}$  [43].

Soseh Z. [46] a développé des équations pour les deux pressions sur des surfaces micro-structurées. La figure 2.4 présente un schéma d'état non-mouillé vis-à-vis aux pressions  $P_L$  et  $P_{wh}$ . Les équations de pressions ainsi développées pour des surfaces circulaires micro-structurées sont données comme ce suit :

$$P_{wh} = \frac{0,5 \rho C v_i}{\frac{1}{a} + \frac{\pi \gamma_{SL}}{4(1+\frac{b}{a})^2} + \left[ \frac{\left(1-\frac{\pi}{4}\right) + \frac{b}{a}(2+\frac{b}{a})}{1+\left(\frac{b}{a}\right)^2} \right] \gamma_{LV}} \quad \text{Équation 2. 4}$$

$$P_L = \frac{-4 \gamma_{LV} \cos \theta_Y}{a(\sqrt{2}-1)+b\sqrt{2}} \quad \text{Équation 2. 5}$$

Avec :

a : diamètre du pilier, b : distance extrémité à extrémité du pilier,  $\rho$  : densité du fluide, C : vitesse du son,  $v_i$  : vitesse de l'impact,  $\gamma_{SL}$ : tension d'interface du solide / liquide,  $\gamma_{LV}$ : tension d'interface de la vapeur /du liquide et  $\theta_Y$ : angle de contact de Young

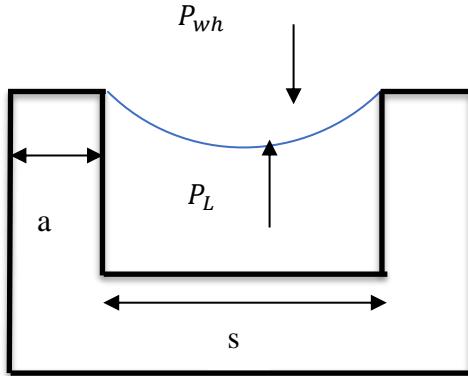


Figure 2. 4: État non-mouillé vis-à-vis aux pressions  $P_L$  et  $P_{wh}$  [43].

#### 2.4. Diamètre d'épandage maximal

Le paramètre d'épandage maximal ( $\beta$ ) de gouttelettes liquides impactant un solide est une mesure directe du maximum du contact solide-liquide. De plus, il est un paramètre important dans différents domaines scientifiques tels que le transfert de chaleur et le flux de fluide. Il est également utilisé dans les applications industrielles, y compris le refroidissement par pulvérisation et l'impression par jet d'encre [44-46]. Ce paramètre exprime le rapport entre  $D_{max}$  et  $D_0$  et peut s'illustrer comme suit :

$$\beta = \frac{D_{max}}{D} \quad \text{Équation 2. 6}$$

Où :  $D_{max}$  : le diamètre maximum de la gouttelette,  $D$  : le diamètre initial de la gouttelette avant l'impact.

Au moment de l'impact D, l'épandage atteint son niveau maximum ( $D_{max}$ ). Cette propagation peut être représentée par le nombre de Weber qui compare l'énergie cinétique à l'énergie de surface [43, 47]. La figure 2.5 [44] présente la dépendance de  $\beta$  par rapport au nombre de We sur les surfaces suivantes : la surface superhydrophile (SHL), la surface hydrophile (HL), la surface superhydrophobe (SHB) et la surface hydrophobe (HB). Ces travaux indiquent qu'une relation directe émerge entre les nombres de We et  $\beta$ .

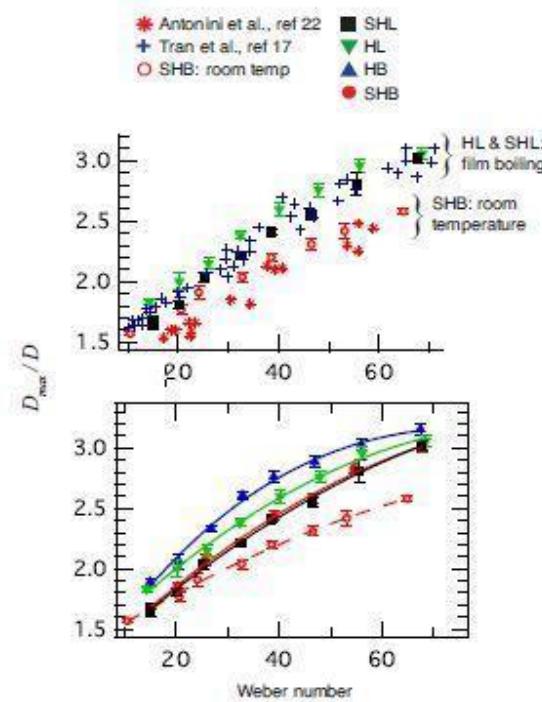


Figure 2. 5: Études antérieures sur l'effet de ( $\beta$ ) sur le nombre de We [46].

## 2.5. Critères d'optimisation de topographie de structure pour un régime de Cassie-Baxter

Dans la littérature, pour avoir un régime non-mouillant de Cassie-Baxter, il existe certains critères d'optimisation de la micro/nano-structure cylindrique. Ces critères comprennent la distance de l'extrémité à l'extrémité du pilier (b) ainsi que la hauteur du pilier (h) [43].

### 2.5.1. Optimisation de la distance de l'extrémité à l'extrémité et de la hauteur du pilier

La réalisation d'une surface non mouillante nécessite de produire un modèle de Cassie-Baxter. Il est montré que pour avoir le régime de Cassie-Baxter dans le cas d'une structure en pilier, il faut avoir une géométrie qui satisfait aux conditions des équations 2.7 et 2.8 [43].

$$b < \frac{A_1}{v_i} F\left(\frac{b}{d}\right) \quad \text{Équation 2. 7}$$

$$h > K \left[ d \left( 1 - \frac{\sqrt{2}}{2} + b \right) \right] \quad \text{Équation 2. 8}$$

Avec :  $F\left(\frac{b}{d}\right) = \frac{\frac{1}{\alpha} + \frac{\pi \gamma_{SL}}{4(1+\frac{b}{d})^2} + \gamma_{LV} \left[ \frac{\left(1 - \frac{\pi}{4} + \frac{b}{d}(2+\frac{b}{d})\right)}{\left(1 + \frac{B}{d}\right)^2} \right]}{\left[ \left( \frac{\sqrt{2}-1}{\frac{b}{d}} \right) + \sqrt{2} \right]}$ ,  $A_1 = \frac{-8\gamma_{LG} \cos \theta_y}{\rho C}$  et  $K = \frac{\sqrt{2}((\sin \theta_y - 1))}{2 \cos \theta_y}$

Sachant que :

$A_1$ ,  $K$  et  $F$  : des fonctions,  $d$  : le diamètre de trous,  $v_i$  : la vitesse de l'impact,  $\theta_y$  : l'angle de contact de Young (angle de contact avant la texturation), et  $\gamma_{SL}$  et  $\gamma_{LV}$  les tensions d'interface du solide / liquide, du liquide / vapeur respectivement.

### 2.5.2. Bilan d'énergie de la gouttelette d'eau se heurtant sur une surface micro-structurée

Certains changements énergétiques surviennent lors de l'impact de gouttelette d'eau sur une surface micro/nano structurée. Ces changements peuvent faire varier le comportement de gouttelette d'eau ainsi que le régime dynamique [45,46]. La gouttelette d'eau avant l'impact a une énergie cinétique résidant dans sa vitesse d'impact  $v_i$ . [43,46-47]. Lorsque la gouttelette heurte la surface, elle se propage. Cette propagation est caractérisée par un diamètre de diffusion ( $D_d$ ) et une vitesse de diffusion ( $v_s$ ). La propagation est causée par la transformation de l'énergie cinétique ( $E_{c_1}$ ) en énergie superficielle ( $E_{s_1}$ ). Une partie de l'énergie superficielle libérée lors de l'impact est convertie en énergie de dissipation visqueuse ( $E_d$ ). L'équation 2.9 présente le principe de conservation de l'énergie d'une gouttelette avant et après l'impact sur une surface micro-structurée (figure 2.6).

Deux hypothèses sont utilisées afin de permettre d'utiliser l'équation 2.9. Avant l'impact, il est considéré que la forme de la gouttelette est sphérique. Par contre, après l'impact de la gouttelette, elle va approximativement prendre la forme d'un disque aplati. Cette seconde hypothèse est considérée seulement si la gouttelette est très déformée proche du point de l'étalement maximal [49].

$$E_{c_1} + E_{s_1} = E_{c_2} + E_{s_2} + E_d \quad \text{Équation 2. 9}$$

Avec :  $E_{c_1} = \frac{1}{12} \pi \rho D^0 v_0^2$ ,  $E_{s_1} = \pi D^2 \sigma$ : les énergies cinétique et surface d'une gouttelette avant l'impact.

En revanche,  $E_{c_2} = \frac{1}{24} \pi \rho D_d^3 v_s^2$ ,  $E_{s_2} = \frac{\pi}{4} D_d^3 \sigma (1 - \cos \theta_A)$  et  $E_d = \emptyset Vt$  sont les énergies

cinétiques, surface et dissipation après l'impact.

L'équation 2.10 présente le bilan de différentes énergies d'une gouttelette avant et après l'impact.

$$BE = 0$$

$$BE = (E_{C_1} - E_{C_2}) + (E_{S_1} - E_{S_2}) + E_d = \pi \rho D^3 (2v_0^2 - v_s^2) + \frac{\pi \sigma [4D_0^2 - D^2(1 - \cos \theta_A)]}{4} + \emptyset V t$$

Équation 2. 10

Avec : D : diamètre initial de gouttelette,  $D_d$ : diamètre de diffusion de gouttelette,  $\sigma$  : tension superficielle de la phase solide- liquide,  $v_i$  : vitesse d'impact de la gouttelette,  $v_s$  : vitesse de diffusion de gouttelette,  $\theta_A$  : angle de contact avancé,  $\rho$  : masse volumique de gouttelette, t : temps de dissipation, V : volume de la gouttelette ainsi que  $\emptyset$  : valeur de dissipation.

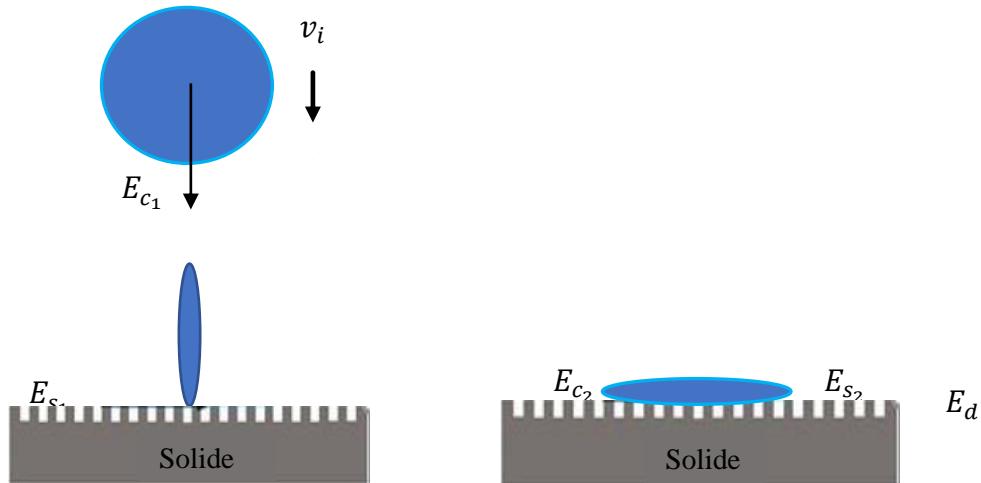


Figure 2. 6: Schéma de différentes énergies avant (a) et après (b) l'impact de gouttelette d'eau sur une surface micro-nano structurée.

Il est bien noté que le comportement d'une gouttelette d'eau est étroitement lié à l'évolution du diamètre de propagation ainsi qu'à la vitesse d'impact et à l'angle de contact avancé. Après l'impact, la gouttelette n'est pas infiniment propagée, elle s'arrête à un diamètre maximum de diffusion en raison de la tension superficielle. Il est à noter que l'énergie superficielle atteint une valeur maximale à la fin de la phase de diffusion car l'énergie cinétique est nulle. La valeur de dissipation est nulle où l'énergie cinétique se transfère totalement en énergie de surface, c'est le cas où un rebondissement total [43-45] est obtenu.

## 2.6. Définition du comportement de la gouttelette d'eau

Dans cette partie, différents scénarios du comportement de gouttelettes d'eau sur une surface solide sont définis comme suit :

- Déposition : la gouttelette reste sur la surface après la propagation, en raison de l'énergie de dissipation élevée (équation 2.9), qui peut empêcher la goutte de récupérer l'énergie pour rebondir. [50,51].
- Éclaboussure rapide : caractérisée par la génération des petites gouttes au niveau de la ligne de contact en parallèle du substrat au moment de l'impact [10, 49-51].

Récession de rupture : se caractérise par la fragmentation de la goutte en très petites gouttes, formant parfois une forme de doigt. Dans la littérature, il est noté que la récession de rupture et l'éclaboussure rapide peuvent survenir dans le même nombre de Weber. Ces deux comportements se font quand We et Re sont élevés (We > 200 et Re > 3000), en raison de mouvement irrégulier de la ligne de contact. Par la suite, la gouttelette se fragmente en petites microgouttes à cause des bulles d'air emprisonnées entre la gouttelette impactante et le substrat [10, 49-51]. Sachant que :

$$Re = \frac{\rho v_i D}{\mu} \quad \text{Équation 2. 11}$$

Ainsi que,

$$We = \frac{\rho v_i^2 D}{\sigma} \quad \text{Équation 2. 12}$$

Avec :  $\rho$  : la densité,  $v_i$  : la vitesse lors de l'impact,  $D$  : le diamètre initial de la gouttelette,  $\mu$  et  $\sigma$  sont la viscosité et la tension de la surface respectivement.

- Jet singulier : se caractérise par le rebondissement d'une très petite gouttelette lorsque la vitesse d'impact est faible [53].
- Rebondissement : la gouttelette rebondit totalement de la surface s'il y a une conversion totale de l'énergie cinétique en énergie de surface, ce comportement est caractérisé par un CAH faible. Cependant, le rebondissement partiel est défini lorsqu'une partie de la gouttelette se rebondit et une partie reste sur la surface après l'impact [49-51].

## 2.7. Recherches antérieures sur l'impact de la gouttelette d'eau sur les surfaces micro-structurées

Des surfaces structurées ont été fabriquées grâce à une technique combinée de lithographie (BP212 photo résiste positive) et de gravure ionique réactive sur une plaquette de silicium [13]. Ces travaux ont été faits afin d'étudier le comportement dynamique de l'impact de gouttelette d'eau sur des surfaces avec des structures avec un arrangement carrés (hydrophobes/superhydrophobes). Deux différents diamètres sont utilisés qui sont : 10  $\mu\text{m}$  avec différents espacements centre à centre du pilier (40, 80, 120 et 150  $\mu\text{m}$ ) ainsi que le deuxième diamètre de 20  $\mu\text{m}$ , avec des espacements centre à centre du pilier (20, 40, 60, 80 et 100  $\mu\text{m}$ ). La hauteur du pilier est de 40  $\mu\text{m}$  pour les deux diamètres. Les résultats obtenus indiquent qu'il existe une relation directe des angles ( $CA_R$ ,  $CA_A$ ) et du (S), ces angles augmentent lors de l'augmentation de l'espacement centre à centre du pilier (S). Les valeurs de l'angle de contact varient entre (127° et 170).

Peichun T. et al [15]. ont fait une étude comparative de l'impact de gouttelette d'eau sur des surfaces micro et nano texturées superhydrophobes. Pour ce faire, des micro-structures à base d'élastomère PDMS ont été fabriqués en forme circulaires et rectangulaires. Ces micro-structures caractérisée par la hauteur (h), le diamètre (d), et l'espacement centre à centre du pilier (S). Grâce aux différents agencements de (h), (S) et (d), la rugosité des micro-structures polymères a été modifiée. Dans leur expériences,  $d = 5 \mu\text{m}$ , h varie entre 6, 10 et 20  $\mu\text{m}$ , et (S) varient entre 1,27 et 5  $\mu\text{m}$ . Le  $R_f$  (la rugosité de surface) correspondant s'étend entre 1,5 et 9  $\mu\text{m}$  pour les micro-structures ainsi créées. Des rebondissements partiels se produisent lorsque (We) varie entre 10 et 130 et lorsque les gouttes d'eau heurtent des micro-structures, avec  $h = 20 \mu\text{m}$  et une rugosité allant de 2 à 9. Notant que, la pression de l'air et la rugosité de surface n'ont pratiquement aucun effet dans ce régime de rebondissement partiel. À un nombre de We plus élevé que 120, les éclaboussures forment plusieurs petites gouttelettes. Ce mécanisme d'éclaboussure est survenu malgré la diminution de la pression de l'air, révélant l'importance de la rugosité submicronique pour les éclaboussures.

Une recherche a été faite afin d'étudier les caractéristiques de l'impact de gouttelette [52], sur des micro et/ou nano-structures ainsi qu'une surface lisse. Une technique de gravure a été utilisé pour la création de ces structures comme montré dans la figure 2.7. Les résultats obtenus dévoilent que les échantillons N et M / N (N : nano, M : micro, M/N : micro/nano) ont des propriétés superhydrophobes, avec un CA $> 160^\circ$  et un CAH très bas (5°). Ces résultats signifient que les échantillons N et M / N sont proches de l'état de Cassie-Baxter. L'échantillon M avait un angle de contact plus grand que celui de N, mais également un CAH plus grand que l'échantillon S (lisse); cela signifie que les micro-structures peuvent former des obstacles au mouvement de gouttelette d'eau sur la ligne de triple de contact (solide-liquide et gaz). Ces caractéristiques de l'angle de contact affectent de nombreux comportements d'impact de gouttelette, y compris la propagation de gouttelette sur la surface, la dynamique de rétraction et l'état final de l'impact tel que la déposition, l'éclaboussure, le rebondissement partiel, le rebondissement total et la fragmentation (figure 2.8). Pour la surface (S), il s'agit d'une déposition et d'un rebondissement partiel qui survient lorsque We et Re augmentent (We  $> 20$ ). Dans la structure (N) : il s'agit du rebondissement total. Cependant, dans la structure (M), la déposition est le comportement dominant. Pour ce qui est de la gouttelette, elle a perdu une grande partie de son énergie lors de l'étalement et de la rétraction, de sorte que la goutte ne pouvait pas quitter la surface. Dans la structure (M/N) : le comportement change du rebondissement total en fragmentation où We et Re augmentent, et que la fragmentation se produit lorsque We  $> 110$ . Cette structure hiérarchique augmentait l'instabilité de l'interface entre le liquide et l'air.

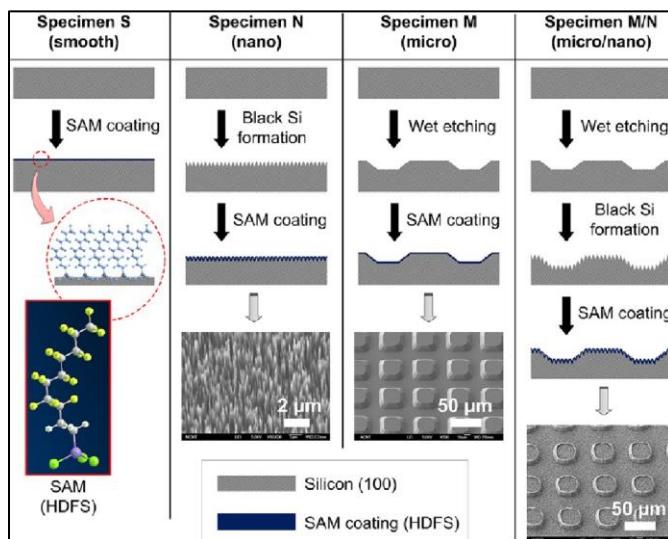


Figure 2. 7 : Schéma de fabrication pour chaque échantillon [52].

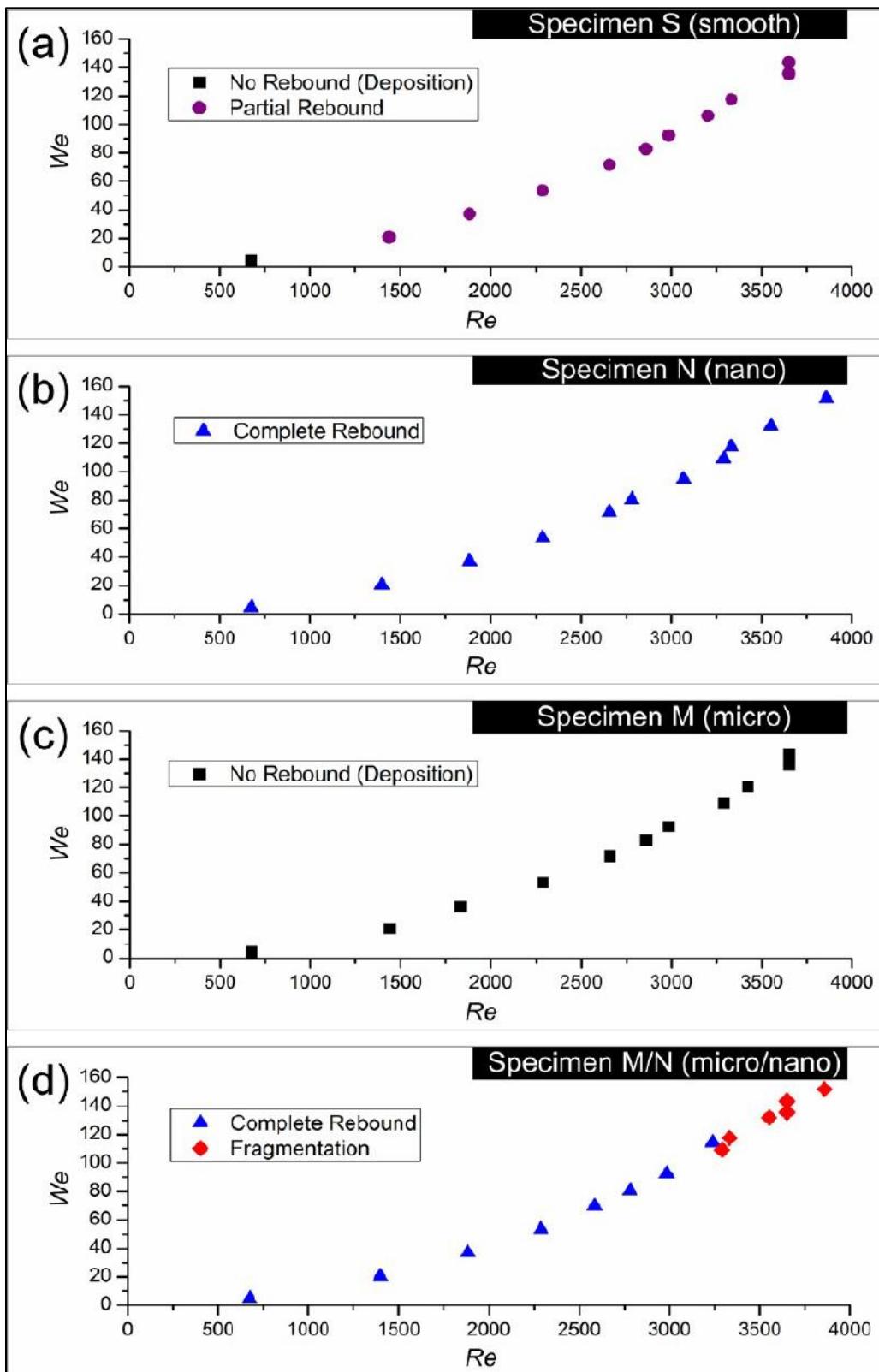


Figure 2.8 : Comportement de gouttelette d'eau en fonction de We et Re sur les surfaces de (a) structure S (lisse), (b) structure N (nano), (c) structure M (micro) et (d) structure M / N (micro / nano) [52].

Une réplication des surfaces structurées à base de PDMS a été fabriquée en utilisant une machine CNC afin d'examiner le comportement de transition du régime de mouillage des gouttelettes d'eau, sachant que les surfaces qui ont été créées ayant ( $d = 105 \mu\text{m}$ ,  $h = 150 \mu\text{m}$  et  $b$  varie de 100 à  $340 \mu\text{m}$  avec un incrément de  $30 \mu\text{m}$ ). Cependant, ils n'ont pas étudié le comportement de la gouttelette d'eau sur les surfaces créées. Les résultats obtenus montrent que la transition de mouillage de l'état de Cassie à l'état de Wenzel survient lorsque le ratio de l'espacement de l'extrémité à l'extrémité du pilier s'augmente ( $b$ ) [53]. Jae Bong Lee et al., ont étudié la dynamique de mouillage et les caractéristiques de diffusion d'une gouttelette se heurtant une surface hydrophobe structurée. Afin de réaliser une micro-structure, un arrangement carré à base d'aluminium (Al 6061) a été fabriqué grâce à une machine CNC (EGX-350, Roland). Cette surface comprend un diamètre de  $125 \mu\text{m}$  et une hauteur de  $125 \mu\text{m}$ , ainsi qu'une distance extrémité à extrémité du pilier de 22,6, 44,9 et  $85,2 \mu\text{m}$  pour chaque surface. Les résultats obtenus montrent que l'angle de contact apparent augmente lorsque la densité des micro-structure cylindrique augmente, en raison de la formation des poches d'air au-dessous de la gouttelette. D'autre part, il s'avère qu'une relation inverse entre le facteur de d'épandage ( $\beta$ ) et la fraction de la surface structurée, de sorte que le facteur de diffusion diminue avec l'augmentation de la fraction de la surface structurée. Pour justifier cette tendance, trois raisons sont possibles : premièrement, la pénétration de la gouttelette à travers les piliers, deuxièmement l'effet de la dissipation visqueuse et troisièmement le changement dynamique de l'énergie de surface provoqué par la structure [48,54].

Plusieurs expériences ont été menées afin d'étudier le phénomène de congélation de la gouttelette surfondue tombant sur une surface froide [22,23,24]. Xu et al ont constaté qu'une augmentation du diamètre maximal déformé de la glace produit sur la paroi, en raison de la cinétique élevée de la gouttelette d'eau (la vitesse de l'impact) [21,55]. J. Zhao et al., ont conclu que le volume total de la glace augmente avec la vitesse de l'impact. Aussi, une relation directe émerge entre la mouillabilité et le volume de la glace, où l'angle de contact statique augmente avec le volume de la glace [22,23,24]. Les surfaces hydrophobes entraîne une grande amplitude des oscillations de la gouttelette en dynamique. De plus, ce genre des surfaces peut donner un saut plus élevé et un temps plus long requis à la gouttelette pour atteindre l'état stable. En effet, une surface plus hydrophobe avec une mouillabilité plus faible entraîne une zone de contact plus faible, un taux de transfert de chaleur plus faible et une congélation retardée [56].

Le tableau 2.1 résume les expériences mentionnées précédemment.

Tableau 2. 1: Résumé des expériences antérieures sur l'impact de la gouttelette d'eau sur les surfaces micro-structurées.

Nature de M /N structure	d [µm]	S [ µm ]	h [ µm ]	We /Re	CA /CAH	Méthode de texturation de la surface	Comportement obtenu /désiré	Référence
<b>Plaquette de silicium</b>		40, 80, 10 120 et 150			127°-170°			
		20, 40, 20 60, 80 et 100	40			Combinée Lithographie / gravure	Rebondissement	13
<b>PDMS</b>	5	1, 2,7 et 5	6, 10 et 20	10-30 >120	EDM	Rebondissement partiel Récession de rupture	15	
<b>Plaquette d'aluminium</b>	125	85, 107 et 147	150			CNC	Rebondissement	48 et 54
<b>Plaquette de silicium</b>	30	60	10	10-140 / 620- 400	>163/ 5	Gravure	Rebondissement complet	52
				121/ 65			Déposition	

## Conclusion

Le régime de Cassie-Baxter est la solution visée dans les volets où l'adhérence de l'eau et de la glace sur la surface est indésirable. La texturation de la surface est l'une des solutions disponibles pour réaliser l'état de Cassie-Baxter et éviter l'état de Wenzel (pénétration de la gouttelette entre les piliers de la surface).

Présentement, les surfaces superhydrophobes ont pris une place importante dans le marché dans différents domaines où la présence de l'eau ou de la glace est indésirable. Donc, la réalisation des motifs micro-structurées est un élément clé pour avoir ces surfaces, en imitant les exemples naturels tels que : la feuille de lotus, peau du requin et les ailes des papillons etc. Cette imitation peut réaliser en utilisant de différentes méthodes de texturation de surfaces, citant : des méthodes mécanique (CNC), des méthodes thermo-fluidique (ablation au laser) etc...

En fait, afin d'avoir une surface superhydrophobe il faut que : la présence d'un matériau hydrophobe (comme PDMS) sur la surface qui caractérise par une faible énergie de surface (Condition chimique) ainsi qu'une surface micro/nano structurée (Condition physique).

Le choix de la méthode de texturation de la surface réside généralement sur le prix, la facilité d'utilisation, la gamme d'applications des matériaux et la qualité de la micro-structure ainsi créée. En effet, la CNC machine est la méthode qui peut répondre aux exigences industrielles.

Par calculs mathématiques, la réalisation de la géométrie ayant la propriété de la superhydrophobicité est possible. Les surfaces ayant une structure cylindrique sont préférable pour avoir des surface superhydrophobe par rapport les autre formes telles que : la forme triangulaire et la forme carrée etc, en raison de la faible zone de contact entre la gouttelette et la surface.

Plusieurs études ont été effectuées afin d'évaluer le comportement dynamique de la gouttelette d'eau et de caractériser la surface. En revanche, jusqu'à présent, il n'existe pas une étude approfondie pour évaluer le comportement dynamique de la gouttelette d'eau sur des surfaces micro-structurées, en modifiant simultanément trois paramètres : (la vitesse d'impact, le diamètre de la gouttelette d'eau ainsi que la topographie de micro-structure ( $v_i$ , d, S et h)).

## CHAPITRE 3

### MATÉRIELS ET MÉTHODES

#### **Méthodologie**

La démarche adoptée pour atteindre les objectifs précédemment mentionnés se résume dans les trois étapes suivantes :

##### **3.1. Préparation des micro-trous**

La micro-structure est créée par une machine à commande numérique (MDX 540). D'une part, cet outil est capable de réaliser différentes textures homogènes et ordonnées pouvant même atteindre des valeurs de distension très réduite entre les trous. D'autre part, il sera possible de construire des trous avec des diamètres micrométriques en se servant des mèches adéquates. La création de différents textures (tableau 3.1) réside dans le choix du diamètre des trous (100 et 75  $\mu\text{m}$ ), de l'espacement centre à centre des trous (de 100 à 300  $\mu\text{m}$  avec un incrément de 25  $\mu\text{m}$ ) et de l'épaisseur de substrat (le kapton 50,9 et 122  $\mu\text{m}$  et l'aluminium 80  $\mu\text{m}$ ).

Tableau 3.1 Conditions de géométrie de création des micro-structures.

Création des micro-structures		Plans de réalisation
Diamètre des trous ; d (µm)	Espacement centre à centre des trous ; S (µm)	Épaisseur de substrat ; e (µm)/ Substrat
100	125	
	150	
	175	50,9 (Kapton) Plan 1
	200	
	225	122 (Kapton) Plan 2
	250	
	275	80 (Aluminium) Plan 3
	300	
75	100	
	125	
	150	
	175	
	200	80 (Aluminium)
	225	
	250	
	275	

### 3.1.1. La conception des prototypes des micro-trous

Les micro-structures ont été créées grâce au logiciel Fusion 360. Ce logiciel permet de :

- Concevoir la structure (en choisissant le diamètre, l'espacement centre à centre des trous, le nombre des trous et l'épaisseur de la texture)
- Choisir la mèche de gravure
- Contrôler les paramètres de gravure (la vitesse de rotation, le zéro ainsi que le taux de gravure)
- Choisir le mode de gravure (diagonal, suivant x, suivant y ou optimisé)

- Générer le code g afin de se connecter avec la machine CNC (MDX 540). Ce code comprend tous les mouvements de la mèche (diagonales et horizontales). À travers le code g la vitesse d'avance ainsi que la vitesse de rotation de la mèche pourraient changer.

### 3.1.2. La gravure des micro-structures

La création des micro-trous est primordiale dans la création des micro-structures. Plusieurs défis ont été rencontrés lors de la gravure avec la machine CNC.

La figure 3.1 montre le processus de gravure afin d'avoir une micro-structure ordonnée et homogène selon les ordres mentionnés dans le code g.

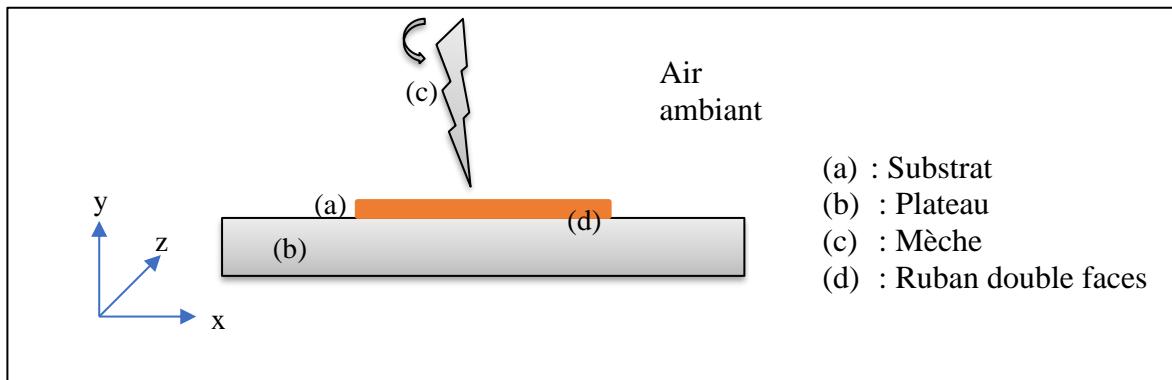


Figure 3. 1: Représentation schématique de gravure.

### 3.2. RéPLICATION de micro-structures avec moulage par compression

La réPLICATION des structures est créée par une machine de compression (Carver Inc. USA) en utilisant le PDSM comme matériau. La machine de compression utilisée est munie d'une presse hydraulique et d'un thermostat, où ces structures peuvent se contrôler via un panneau de configuration. La presse hydraulique sert à appliquer une force. Le thermostat sert à chauffer les deux plaques de la machine. La température, la pression et la durée d'exécution sont des facteurs importants afin d'avoir une bonne réPLICATION de micro-textures. Cette étape est cruciale, car elle donne des motifs micro-structurés qui contiennent des piliers. Ces piliers permettent d'étudier le comportement dynamique de gouttelette d'eau. Cette phase de travail est basée sur 3 étapes qui sont : la préparation de matériel moulé, le chauffage et le moulage ainsi que le démoulage et le refroidissement.

### 3.2.1. Préparation de matériel moulé

Dans cette étape, la micro-structure fabriquée dans la première phase de travail a été mise dans un moule, un PDMS utilisé comme matériel de moulage a été mis par-dessus.

### 3.2.2. Chauffage et moulage

Dans cette étape, l'échantillon a été mis sur le plateau de la machine de compression. Au niveau du panneau de configuration de cette machine, il est possible d'appliquer une force et une température ajustée pour un temps de compression, ce qui est indispensable pour avoir un insert bien répliqué sans endommager la micro-structure. De plus, la figure 3.2 explique le processus de chauffage et de moulage. Le tableau 3.2 montre les conditions expérimentales de fabrication des micro-structures à base de PDMS pour obtenir des micro-structures bien répliquées.

Tableau 3.2 : Conditions de géométrie de création des micro-structures.

Matériel	PDMS
<b>Conditions</b>	
<b>Poids</b>	8 (g)
<b>Température</b>	160 (°C)
<b>Force</b>	3200 (LB)
<b>Temps de compression</b>	6 mins

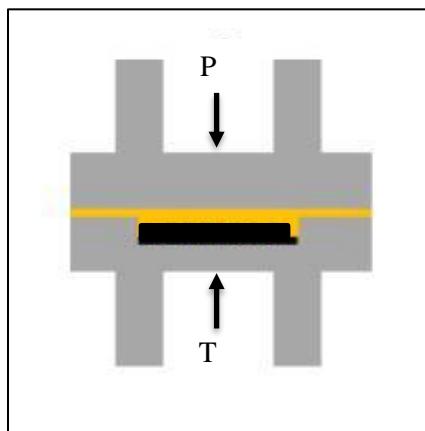


Figure 3. 2: Processus de chauffage et de moulage [14].

### 3.2.3. Démoulage et refroidissement

À ce stade, le moule de la machine à compression a été retiré puis le PDMS a été soigneusement séparé de micro-structure afin de la préserver. La figure 3.3 montre la façon de démoulage et de refroidissement avec l'air ambiant.

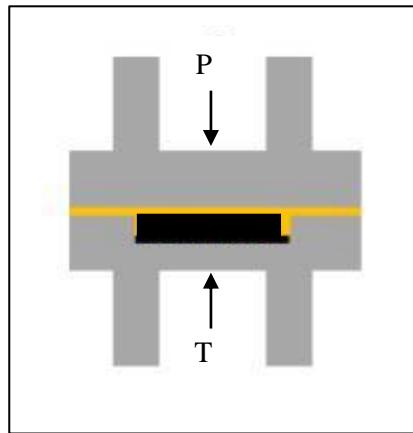


Figure 3. 3: Processus de chauffage et de démoulage [14].

La figure 3.4 montre une micro-structure répliquée caractérisée par le diamètre du pilier, hauteur du pilier et espacement centre à centre du pilier. Sachant que :

$d$  : le diamètre du pilier,  $S$  : l'espacement centre à centre du pilier et  $h$  : la hauteur du pilier.

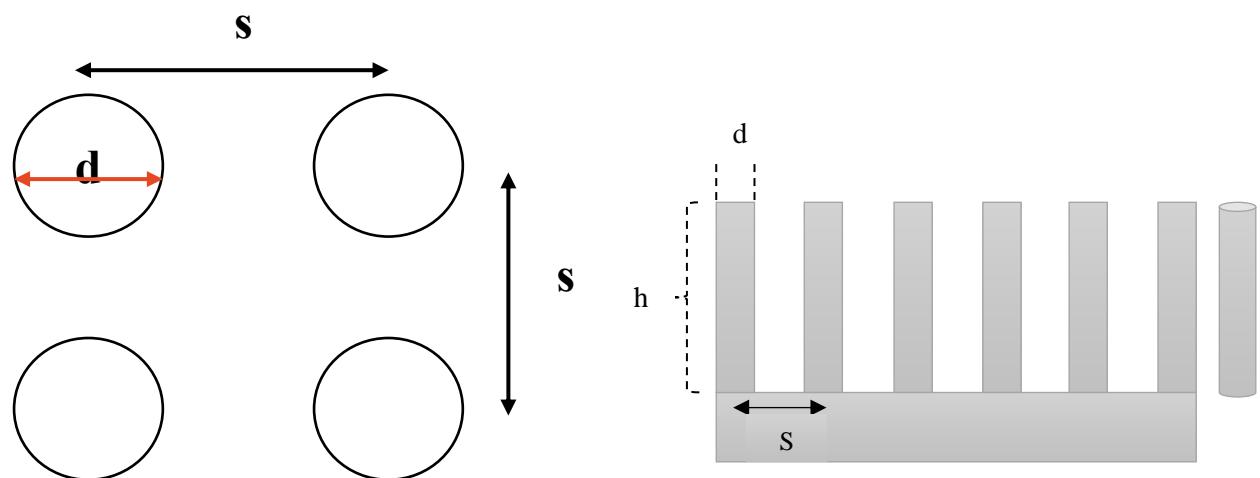


Figure 3. 4: Schéma d'une micro-structure après le moulage par compression.

### 3.3. Caractérisation de la surface

En premier lieu, l'angle de contact a été mesuré pour distinguer le type de surface créé en utilisant un goniomètre Kruss™ DSA100 (figure 3.5) avec une gouttelette d'eau déminéralisée. La machine utilise une seringue pour déposer la gouttelette d'eau sur la surface. Le changement du diamètre de gouttelette déposée est fait en fournissant une aiguille adéquate ( $V= 10$  et  $20 \mu\text{l}$ ). Une fois la gouttelette déposée, le logiciel DSA 3 va détecter automatiquement l'interface solide de la surface et basé sur l'analyse de l'image captée, le logiciel donne automatiquement la valeur de l'angle de contact à droite (CA[R]) et l'angle de contact à gauche (CA[L]). L'angle de contact correspond à la moyenne de ces deux valeurs comme illustré dans la (figure 3.6).

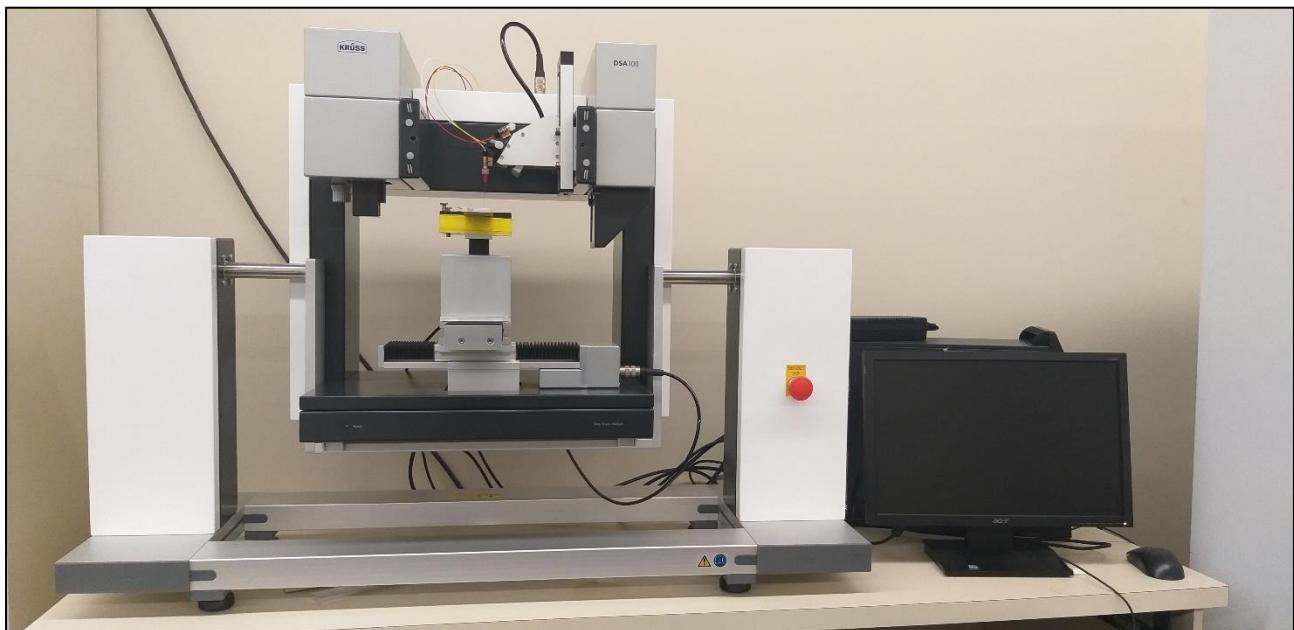


Figure 3. 5: Mesure de l'angle de contact Kruss™ DSA100.

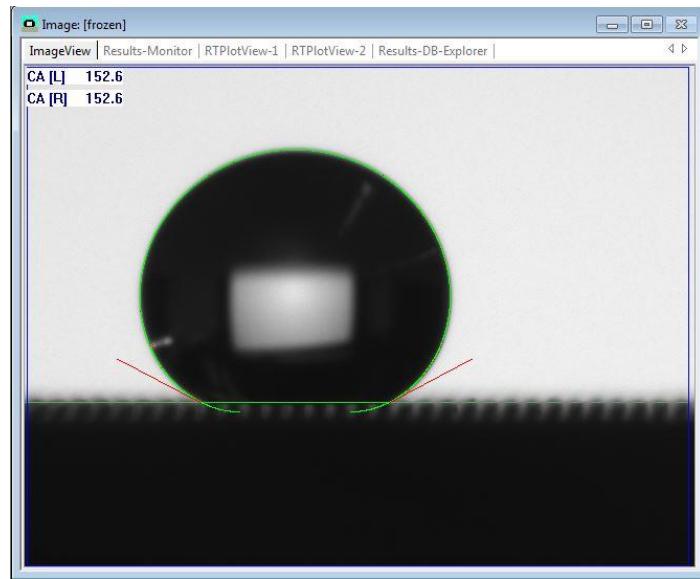


Figure 3. 6: Angle de contact d'une gouttelette (2,67 mm de diamètre) déposée sur une surface micro-structurée.

En second lieu, la mesure de l'hystérésis de l'angle de contact est obtenue à l'aide des logiciels ImageJ, ce qui correspond à soustraire l'angle de contact avancé et l'angle de contact reculé.

$$CAH = CA_{adv} - CA_{rec} \quad \text{Équation 3. 1}$$

L'hystérésis valide la superhydrophobicité de la surface dont la valeur est inférieure de 10°. Cet angle présente la résistance de la gouttelette à la force de l'adhérence [1, 6-8]. Le logiciel ImageJ mesure l'hystérésis de l'angle de contact en fournissant une image déjà captée dans l'étape précédente y compris le premier mouvement de gouttelette vers la gauche ou vers la droite (figure 3.7).

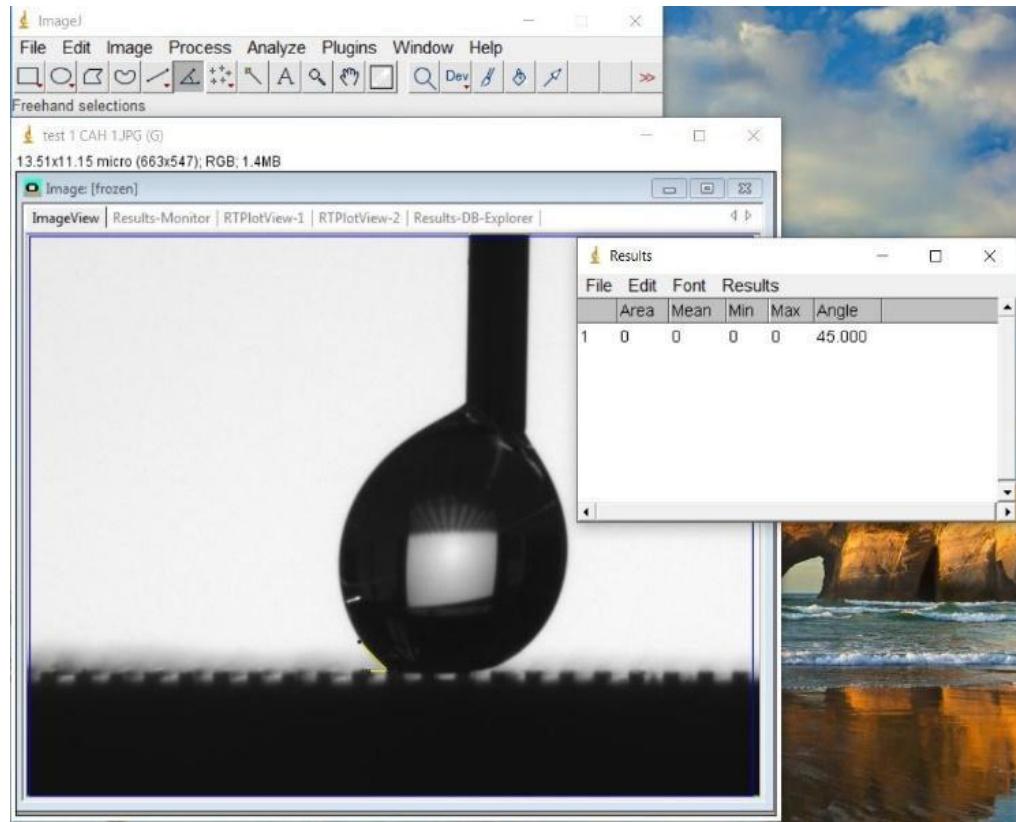


Figure 3. 7: Mesure de CAH sur logiciel ImageJ.

En troisième lieu, des mesures avec un microscope à balayage (figure 3.8) ont été faites afin de valider la réPLICATION des micro-structures, et montrer le design des micro-structures ainsi fabriquées. Les photos enregistrées permettent d'évaluer  $d$ ,  $S$  et  $h$ .

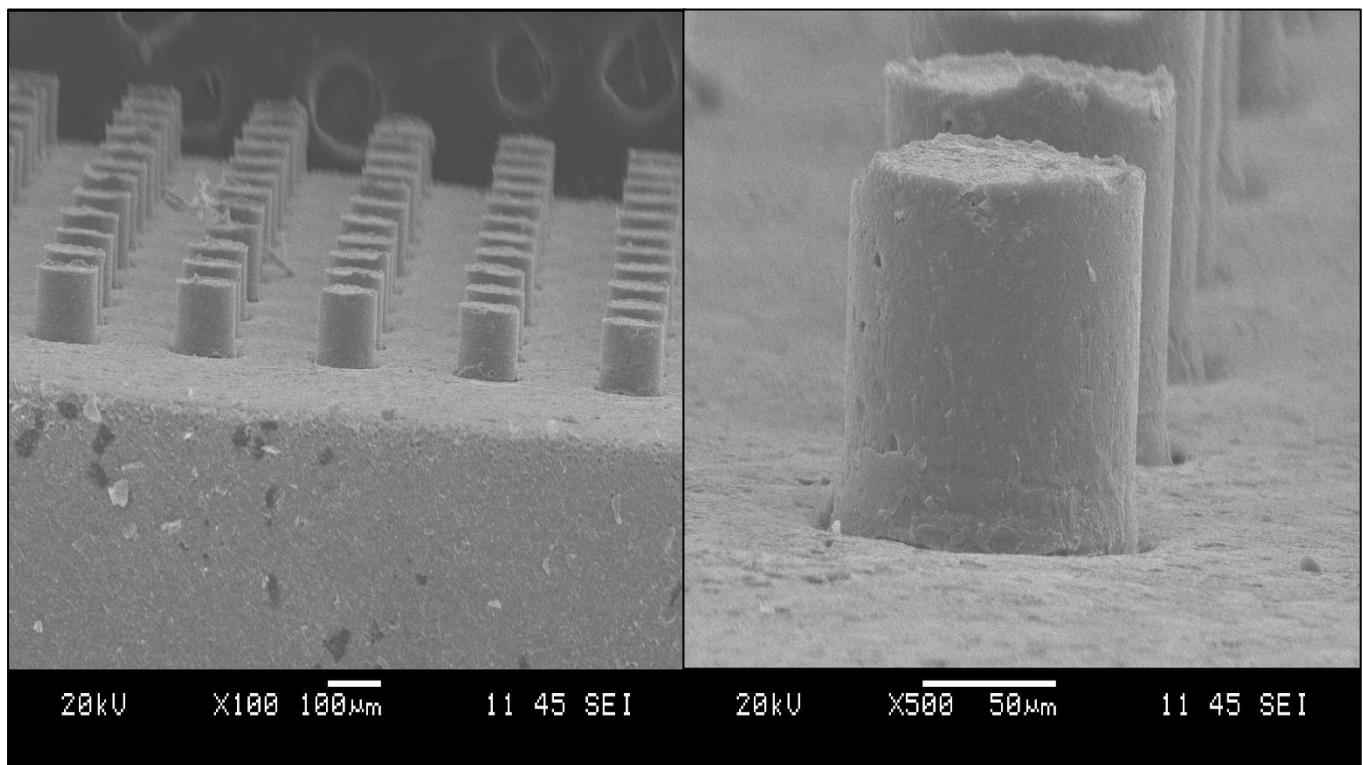


Figure 3. 8: Image MEB de la micro-structure de l'aluminium.

### 3.4. Étude du comportement de la gouttelette d'eau

Cette partie expérimentale a pour but d'étudier l'impact de gouttelettes d'eau sur les surfaces micro-structurées grâce au système illustré à la figure 3.9. Ce système comprend une caméra à haute vitesse (Photron Model SA 1.1), deux buses de seringue différentes pour faire varier les diamètres de goutte et un support afin d'avoir différentes positions pour faire varier les vitesses d'impact de la gouttelette d'eau. La procédure d'enregistrement des vidéos est mentionnée à l'annexe A.III.1.

Au stade final, cette étape servira pour une étude approfondie du phénomène de l'impact des micro-gouttelettes sur la surface.

Le tableau 3.3 expose les défis et les solutions lors de cette phase de travail.

Tableau 3. 3 : Défis et solutions rencontrés pendant la réalisation du projet de recherche.

Phase de travail	Procédé	Défis	Solution
<b>Phase I</b>	Gravure des micro-structures	Cassure de la mèche	Installer un plateau à base de polystyrène afin d'absorber le choc.
		L'espace libre entre le substrat et le plateau	Utiliser un ruban double face.
<b>Phase II</b>	Préparation de matériel moulé	Résidus de Kapton attachés sur la micro-structure	Mettre la micro-structure dans un bécher qui contient la solution de Dicon 9, puis on le met sur un système d'agitation, afin de minimiser les résidus.
	Démoulage	Difficulté d'enlèvement du PDMS de micro-structure	Utilisant un agent de démoulage (Trasys) fourni par l'entreprise Stoner.
<b>Phase IV</b>	Enregistrement de vidéo	Vidéo floue	Changer la luminosité.
		Gouttelette n'est pas claire	Ajuster la distance entre la caméra à haute vitesse et la micro-structure.

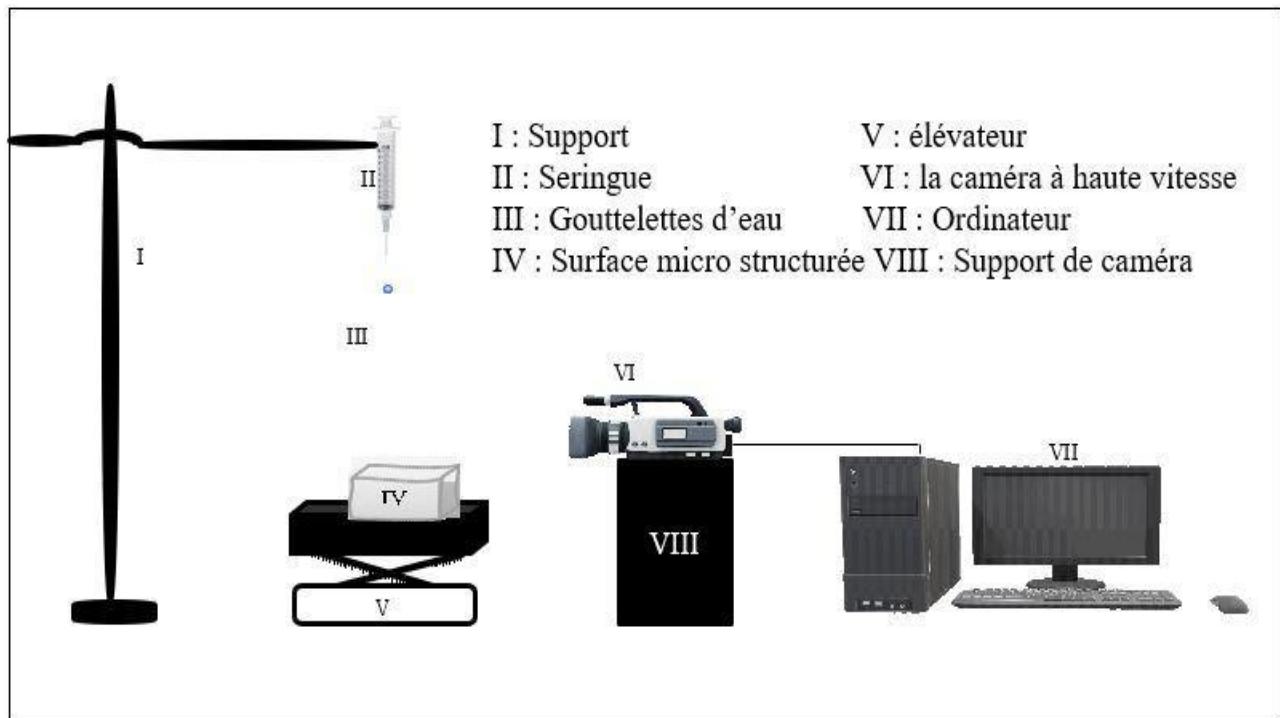


Figure 3. 9: Montage expérimental pour étudier le comportement des gouttelettes d'eau sur de différentes surfaces développées.

## CHAPITRE 4

# RÉALISATION DES SURFACES MICRO-STRUCTURÉES

### Réalisation des surfaces micro-structurées

Dans ce chapitre, les résultats des surfaces créées avec la machine CNC et leur réplication sont présentées.

#### 4.1. Réalisation des micro-trous

La réalisation des trous s'est faite par l'utilisation de deux différents substrats, polymérique (Kapton) et métallique (Aluminium). Comme mentionné, plusieurs micro-trous avec différents diamètres ont été développés. Les tableaux 4.1 et 4.2 présentent les différentes conditions de la création des micro-trous, le nombre des trous réalisés ainsi que la durée de réalisation pour les diamètres de 100 et 75  $\mu\text{m}$  respectivement.

Pour le premier diamètre, il s'agit de huit différents tests. Cette différence se définit par la variation de l'espacement centre à centre des trous (300, 275, 250, 225, 200, 175, 150 et 125  $\mu\text{m}$ ), en utilisant deux différentes épaisseurs de Kapton (50,9 et 122  $\mu\text{m}$ ) et une épaisseur d'aluminium (80  $\mu\text{m}$ ). Ainsi pour le diamètre de 75  $\mu\text{m}$ , cinq surfaces sur le substrat d'aluminium, ayant un (S)= 125-225  $\mu\text{m}$  avec un incrément de 25  $\mu\text{m}$ , ont été réalisées

L'équation 2.7 et 2.8 a été utilisé pour déterminer les valeurs de l'espacement centre à centre (S) ainsi que la hauteur afin d'avoir le régime de Cassie Baxter. D'après les calculs, pour les diamètres de 100 et 75  $\mu\text{m}$ , il faudrait réaliser des micro-structures avec  $10 \mu\text{m} \leq S \leq 80 \mu\text{m}$  et  $h > 20 \mu\text{m}$ ., selon la variation des vitesses d'impact  $[0,36-2,2 \frac{m}{s}]$ .

Les figures 4.1 à 4.3 montrent les images microscope optique des micro-trous de 100  $\mu\text{m}$  de diamètre obtenu avec le Kapton d'une épaisseur de 50,9  $\mu\text{m}$ ), le Kapton d'une épaisseur de 120  $\mu\text{m}$  et l'aluminium d'une épaisseur de 80  $\mu\text{m}$  respectivement. Le reste des figures pour ce diamètre sont présentées dans l'annexe A.IV.1. Le diamètre moyen des trous est de l'ordre de  $105 \pm 3 \mu\text{m}$  et les distances centres à centres des trous sont respectées selon les conditions pour les trois substrats (tableau 4.1). En outre, il existe plus de résidus de Kapton attachés sur la micro-structure de Kapton avec l'épaisseur de 50,9  $\mu\text{m}$  par rapport au Kapton 120  $\mu\text{m}$ . La présence des résidus pourrait être due à la présence de la force d'électrostatique qui empêchera l'évacuation des résidus par l'air ambiant

en raison de la résistivité élevée de kapton. En revanche, l'aluminium ne contient pas de résidus attachés sur la micro-structure.

Quant à la figure 4.4, elle montre les micro-trous avec un diamètre de 75  $\mu\text{m}$ . Le diamètre moyen des trous est de  $78 \pm 4 \mu\text{m}$  en gardant la même hauteur du substrat d'aluminium (80  $\mu\text{m}$ ).

Tableau 4. 1: Conditions expérimentales pour la création des micro-trous pour un diamètre de 100  $\mu\text{m}$ .

Tests	Conditions				
	(b) Conçu [ $\mu\text{m}$ ]	(b) obtenu [ $\mu\text{m}$ ]	Vitesse de rotation de mèche [ $\frac{tr}{min}$ ]	Nombre des trous	Durée
1	125	125 $\pm 2$	12000	2601	3 j 5 h
2	150	150 $\pm 1$		3481	2 j 2 h
3	175	175 $\pm 2$		3969	17 h 23 min
4	200	200 $\pm 3$		4624	14 h 19 min
5	225	225 $\pm 3$		3249	1 j 9 h
6	250	250 $\pm 2$		4900	1 j 4 h
7	275	275 $\pm 1$		10609	21 h
8	300	300 $\pm 3$		15129	16 h

Tableau 4. 2: Conditions expérimentales pour la création des micro-trous pour un diamètre de 75  $\mu\text{m}$ .

Tests	Conditions				
	(b) Conçu [ $\mu\text{m}$ ]	(b) obtenu [ $\mu\text{m}$ ]	Vitesse de rotation de mèche [ $\frac{tr}{min}$ ]	Nombre des trous	Durée
1	125	125 $\pm 2$	12000	2981	3 j 13 h
2	150	150 $\pm 1$		3795	2 j 19 h
3	175	175 $\pm 2$		4123	3 j
4	200	200 $\pm 3$		4375	3 j 5 h
5	225	200 $\pm 3$		4879	3 j 19 h

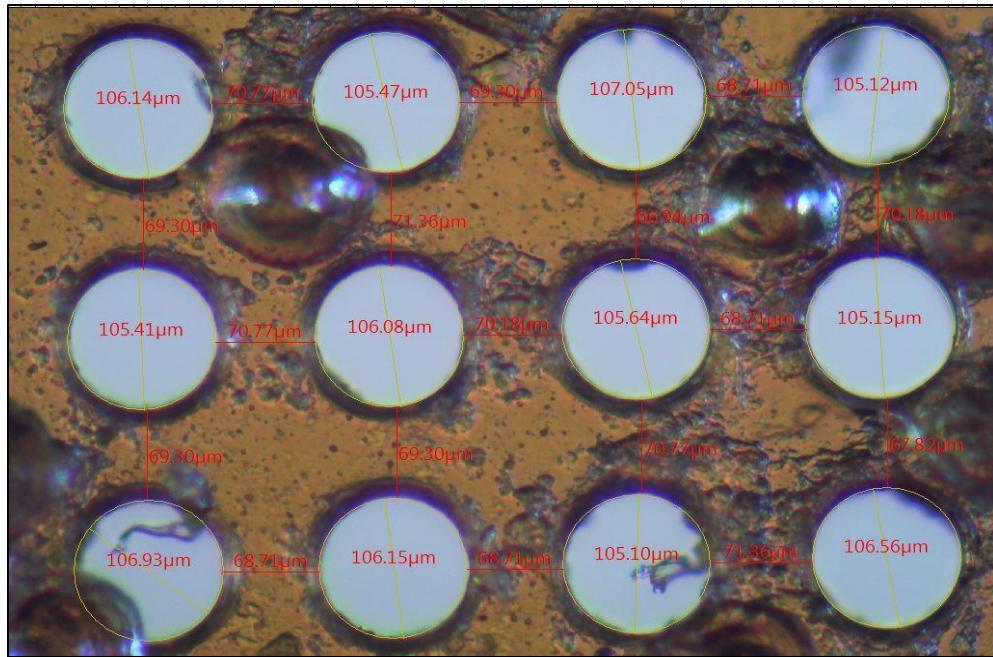
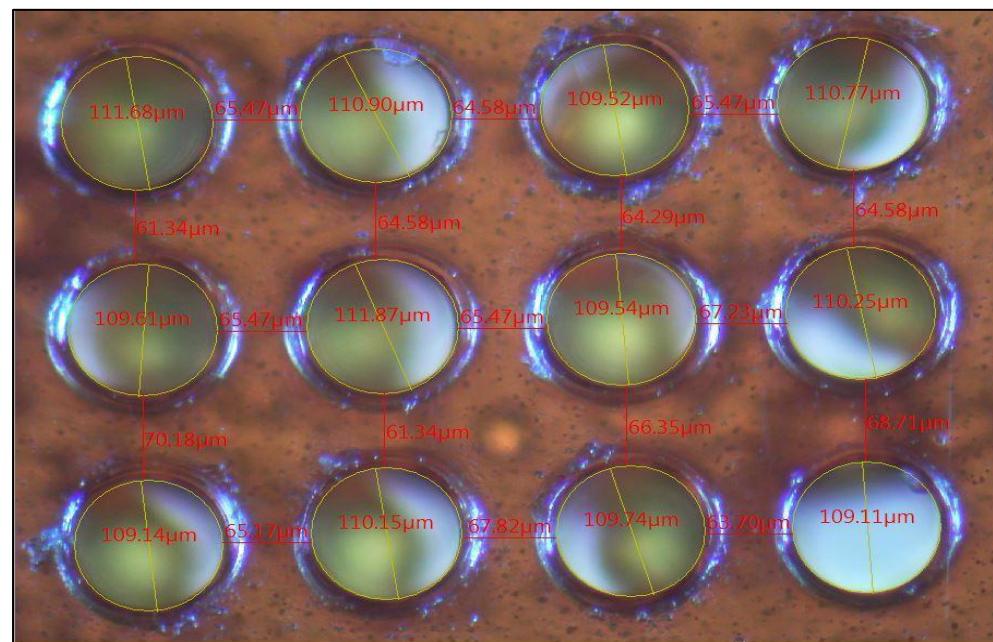


Figure 4. 1: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 50,9  $\mu\text{m}$ .



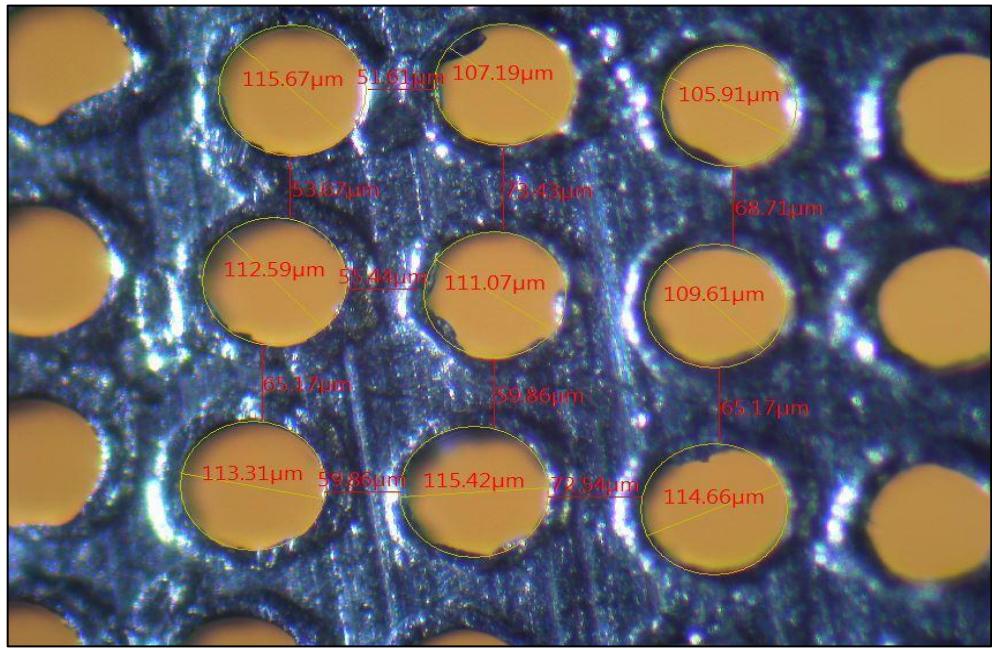


Figure 4. 3: Image microscope optique (100X) des trous réalisés sur de l'aluminium avec l'épaisseur de 80  $\mu\text{m}$  pour un diamètre de 100  $\mu\text{m}$ .

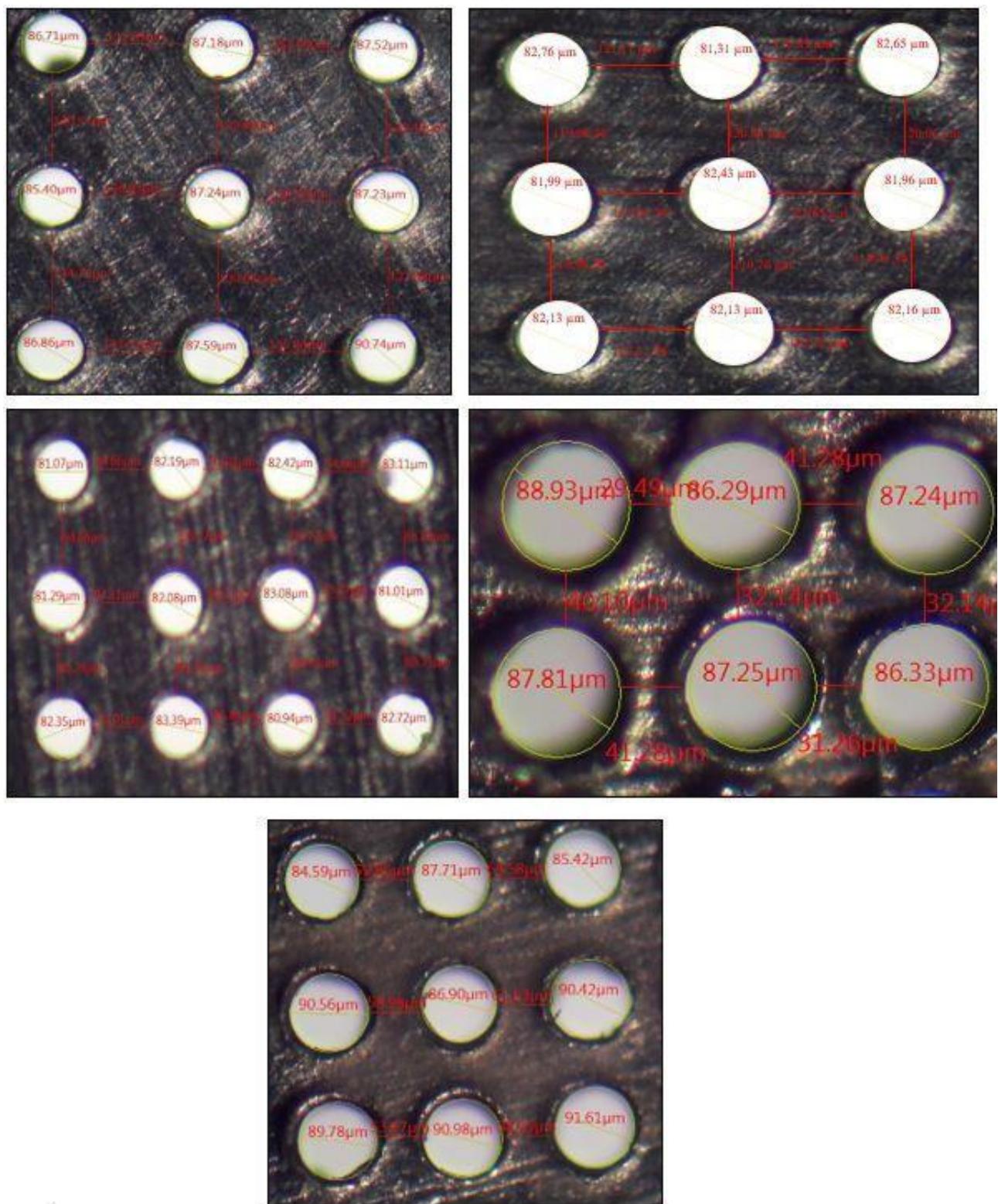


Figure 4. 4: Images microscopes optique (100X) des trous réalisés sur de l'aluminium avec l'épaisseur de 80 μm pour un diamètre de 75 μm.

## 4.2. Moulage par compression

Après avoir répliqué les micro-structures obtenues dans la partie précédente sur le PDMS, les mesures de diamètres des trous répliqués ainsi que des hauteurs des piliers sont réalisées à l'aide d'un microscope optique (figure 4.5) et par un microscope électronique à balayage MEB (figures 4.6-4.13). Il s'avère que le diamètre des trous est de l'ordre de  $106 \pm 3 \mu m$  et les distances centres à centres des trous sont respectées selon les conditions des tests pour les deux épaisseurs de Kapton ainsi que pour l'aluminium (voir les figures 4.6-4.11). En outre, pour la valeur de la hauteur des piliers, elle est de l'ordre de  $70 \pm 2 \mu m$  cela pour la kapton avec l'épaisseur de  $50,9 \mu m$ , de  $138 \pm 5 \mu m$  pour le kapton avec l'épaisseur de  $120 \mu m$ , et de  $90 \pm 3 \mu m$  pour l'aluminium. Il existe une différence entre la hauteur des piliers réalisés par le moulage en compression et l'épaisseur des substrats utilisés pour créer les micro-structures, de sorte que la hauteur du pilier augmente dans la phase du moulage par compression. Cette différence est dû au fait que lors de la compression, le PDMS traverse verticalement et remplit les micro-trous du substrat (kapton ou aluminium), qui sont ouverts de l'autre côté. Les figures 4.6 – 4.11 montrent la topographie de la micro-structure après le moulage par compression pour le Kapton ( $50,9 \mu m$ ), le Kapton ( $122 \mu m$ ) et l'aluminium ( $80 \mu m$ ) pour le diamètre de  $100 \mu m$ .

La réplication des micro-structures ont été uniquement faite pour les surfaces des micro-trous de l'aluminium grâce à leur meilleure qualité de la réplication. En effet, les figures 4.12 et 4.13 dévoilent les topographies des micro-structures ayant un diamètre moyen de  $78 \pm 4 \mu m$ . Les mesures de la hauteur ont été faites via le logiciel ImageJ sur les image pris par MEB. Il est à noter qu'une micro-structure d'aluminium comportant un espacement centre à centre du pilier de  $125 \mu m$  ne s'est pas réalisée car il est difficile d'enlever le substrat d'aluminium collé sur PDMS.

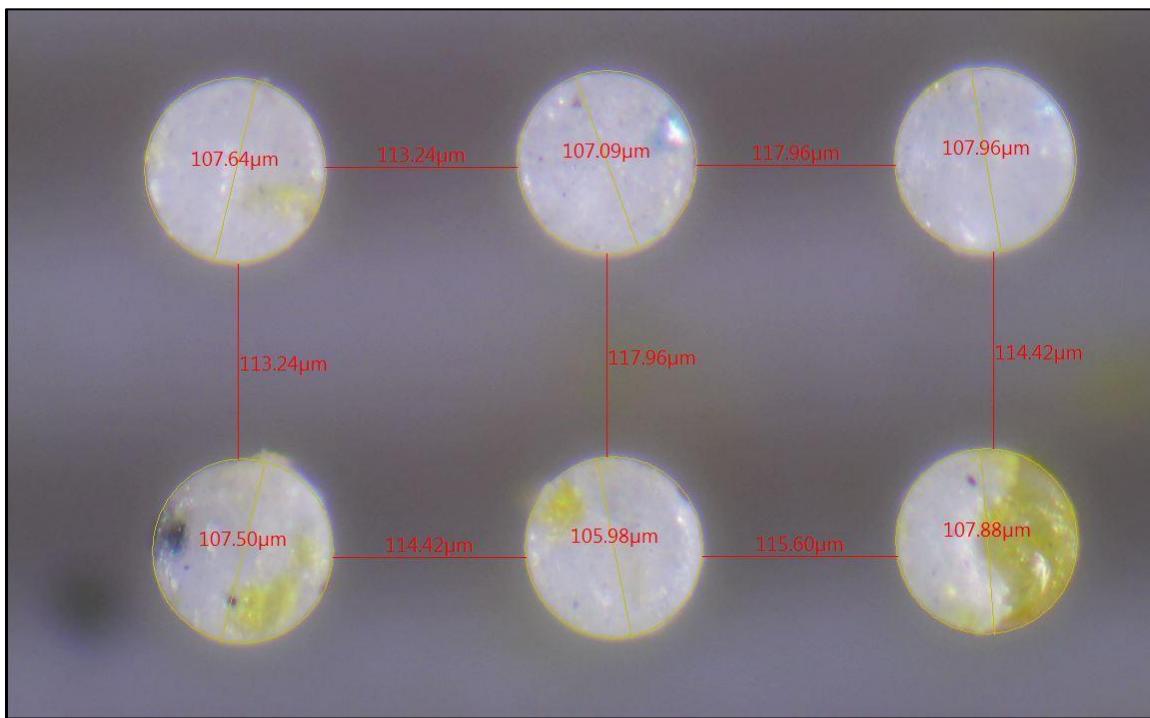


Figure 4.5: Image des micro-structures répliqués obtenue à l'aide du microscope optique (magnification 100X, vue de haut).

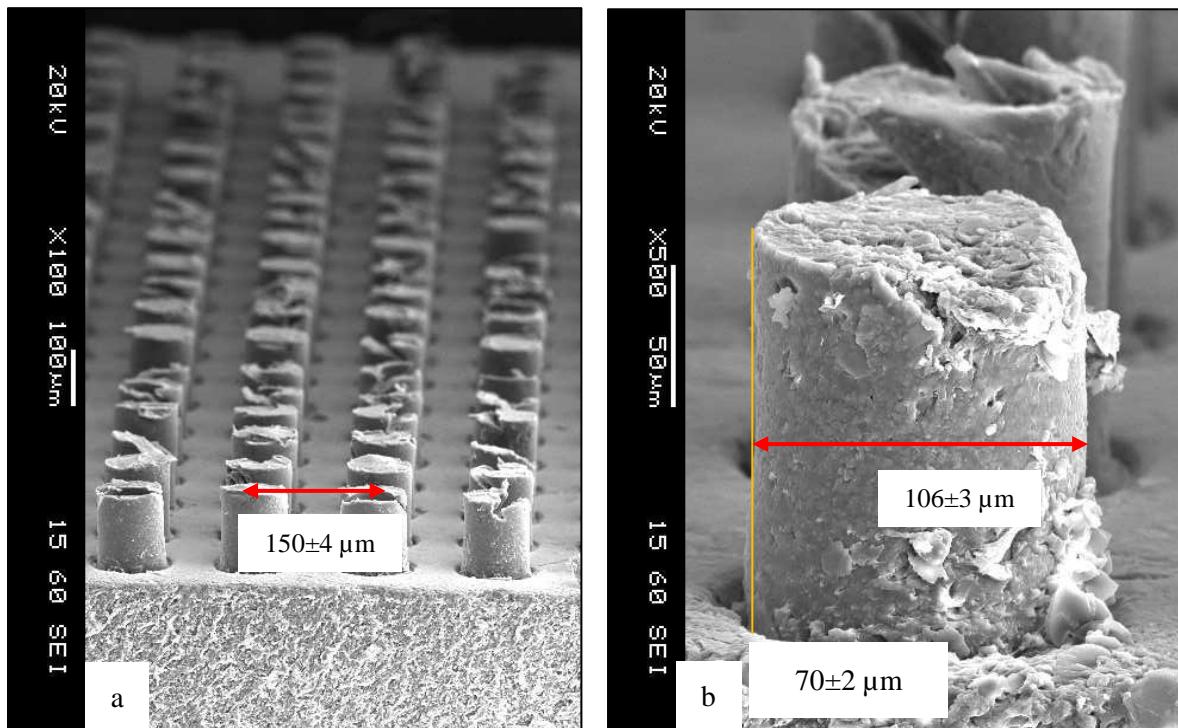


Figure 4.6 : Image MEB de la hauteur des piliers du Kapton (50,9  $\mu\text{m}$ ) et  $d= 100 \mu\text{m}$ ,  $S= 150\pm4 \mu\text{m}$ , (a) : vue de face (magnification 100X) et (b) : vue de face (magnification 500X).

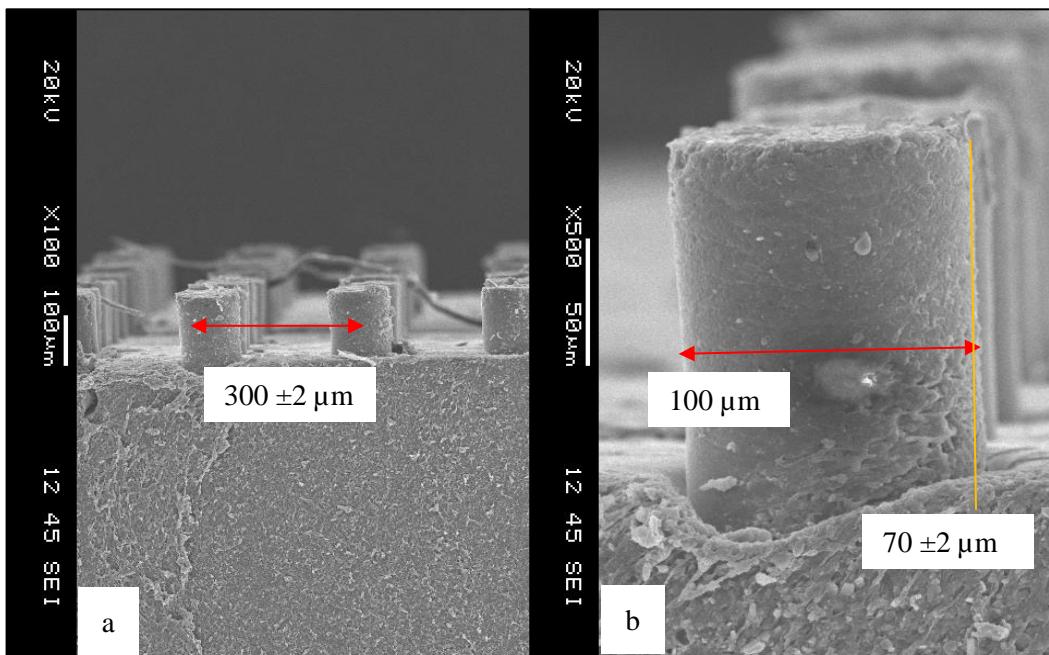


Figure 4. 7: Image MEB de hauteur du pilier du Kapton (50,9  $\mu\text{m}$ ) et  $d= 100 \mu\text{m}$ ,  $S= 300\pm 2 \mu\text{m}$ , (a) : vue de face (magnification 100X) et (b) : vue de face (magnification 500X).

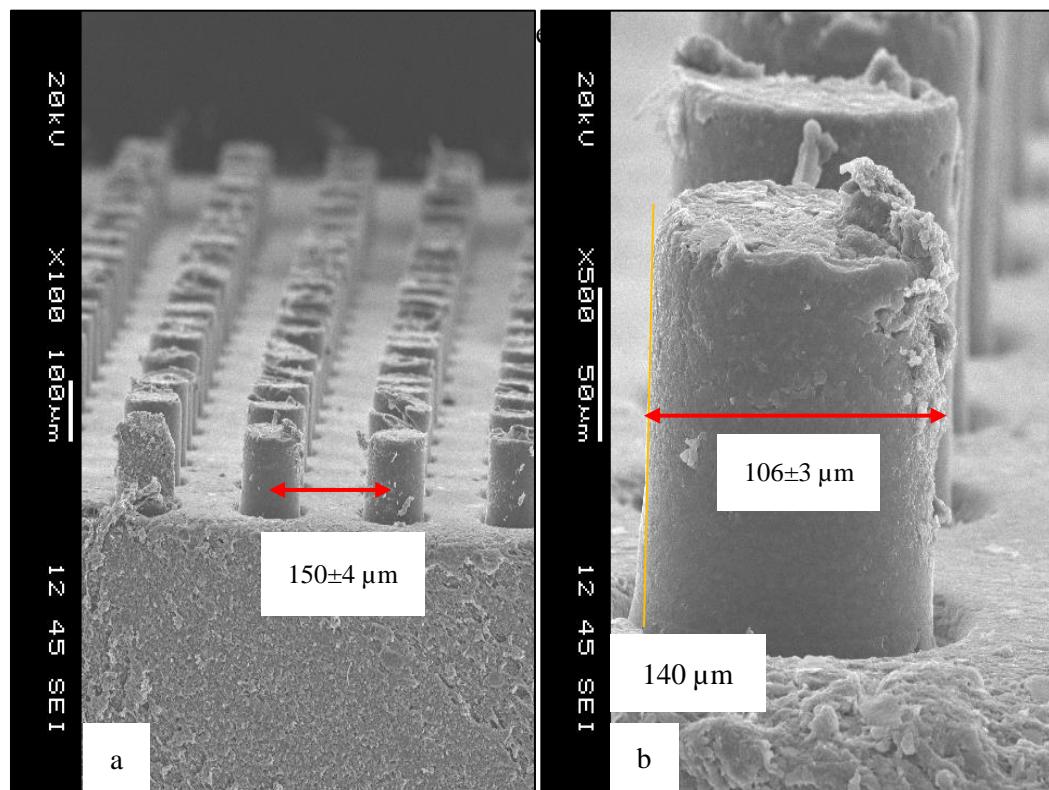


Figure 4. 8: Image MEB de hauteur du pilier du Kapton (122  $\mu\text{m}$ ) et  $d= 100 \mu\text{m}$  et  $S=150\pm 4 \mu\text{m}$  (a) : vue de face (magnification 100X) et (b): vue de face (magnification 500X).

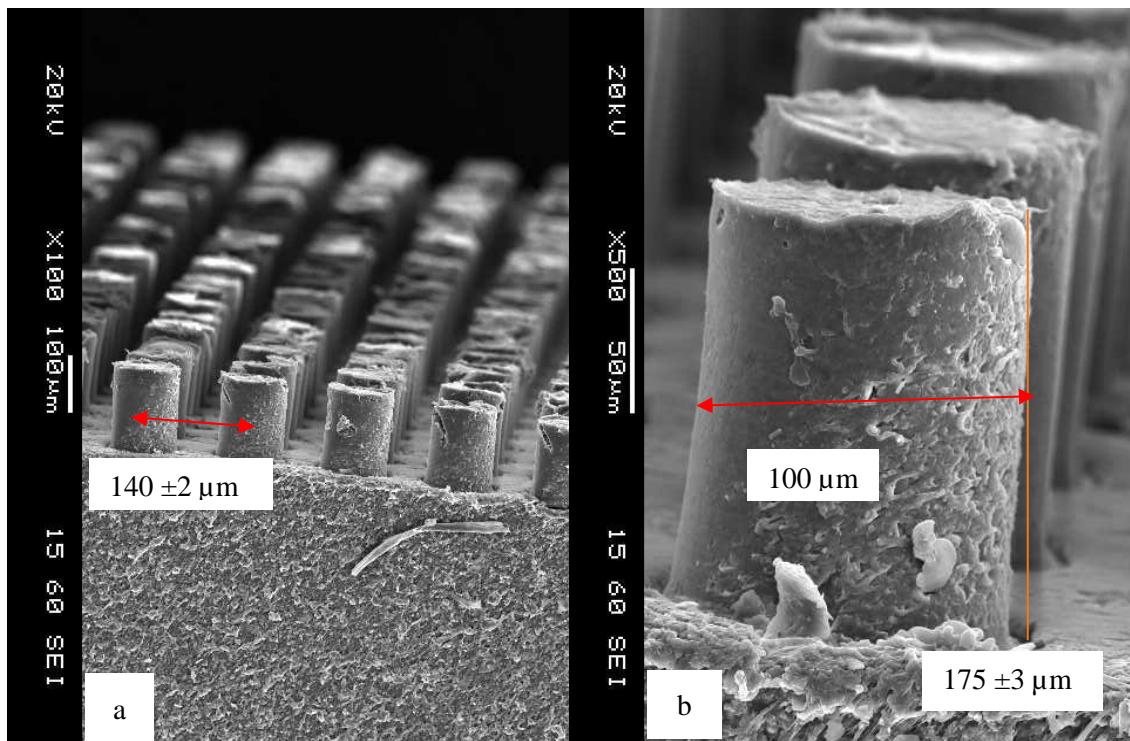


Figure 4. 9: Image MEB de hauteur du pilier du Kapton ( $122 \mu\text{m}$ ) et  $d= 100 \mu\text{m}$ ,  $S= 175 \pm 3 \mu\text{m}$ , (a) : vue de face (magnification 100X) et (b) : vue de face (magnification 500X).

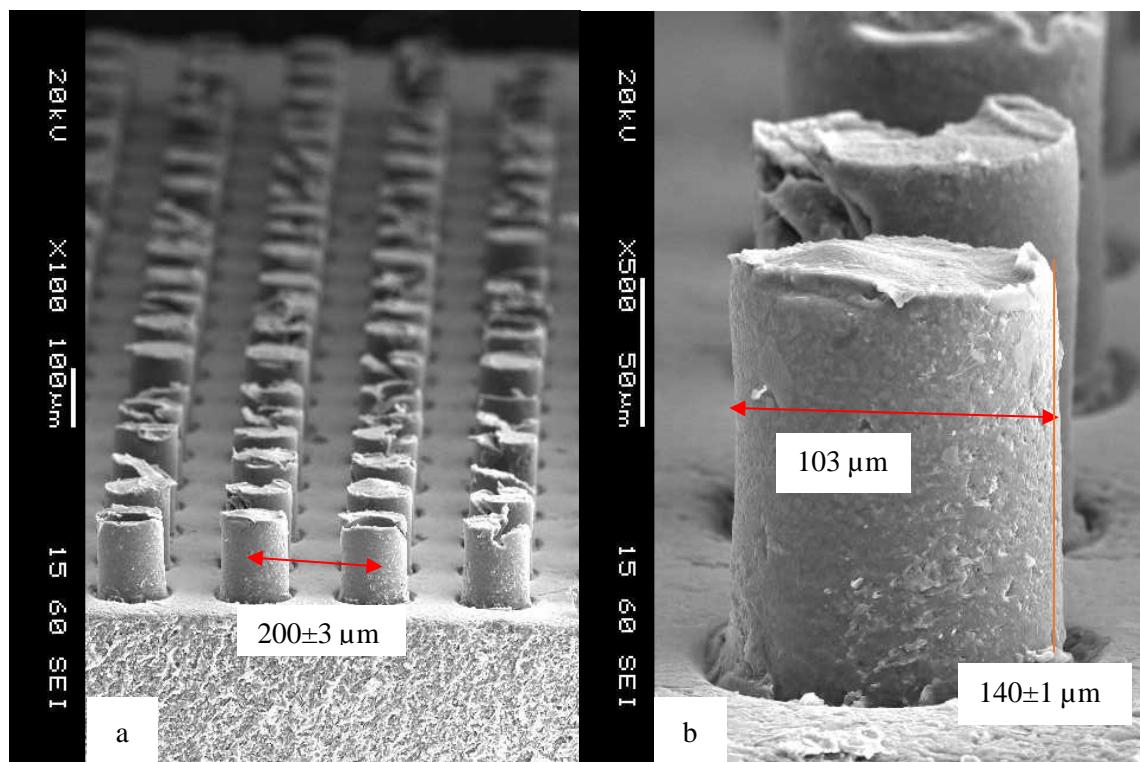


Figure 4. 10 : Image MEB de hauteur du pilier du Kapton ( $122 \mu\text{m}$ ) et  $d= 100 \mu\text{m}$ ,  $S= 200 \pm 3 \mu\text{m}$ , (a) : vue de face (magnification 100X) et (b) : vue de face (magnification 500X).

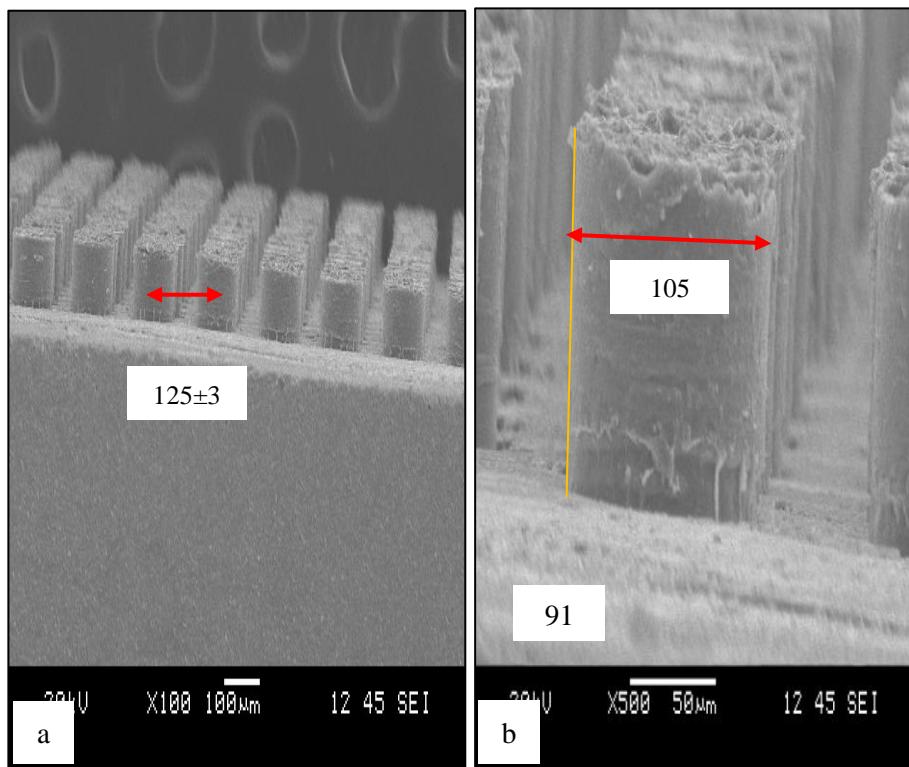


Figure 4. 11: Image MEB de hauteur du pilier d'aluminium ( $80 \mu\text{m}$ ) et  $d= 100 \mu\text{m}$  et  $S= 125\pm3 \mu\text{m}$   
 (a) : vue de face (magnification 100X) et (b): vue de face (magnification 500X).

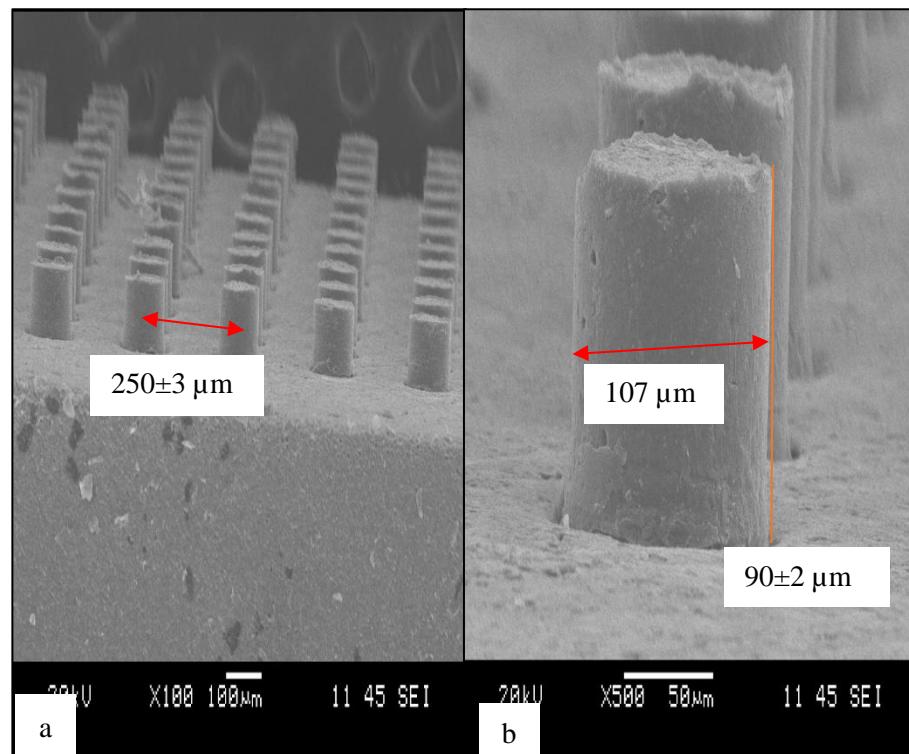


Figure 4. 12: Image MEB de hauteur du pilier du Kapton ( $122 \mu\text{m}$ ) et  $d= 100 \mu\text{m}$ ,  $S= 250\pm3 \mu\text{m}$ , (a) : vue de face (magnification 100X) et (b) : vue de face (magnification 500X).

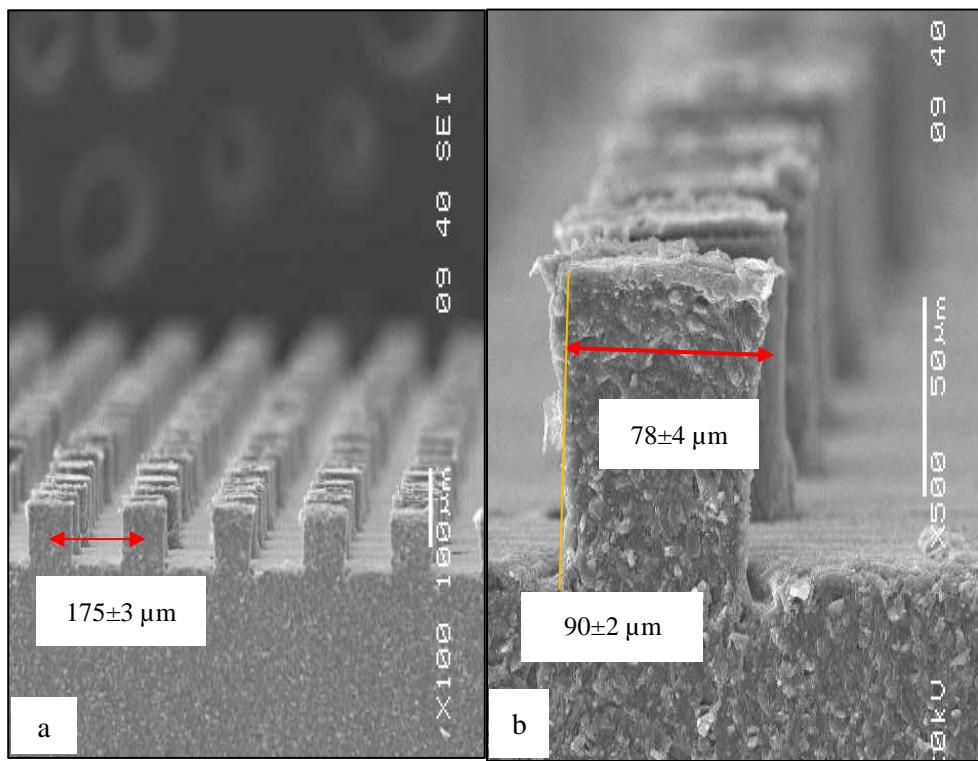


Figure 4. 13: Image MEB de hauteur du pilier d'aluminium ( $80 \mu\text{m}$ ) et  $d = 75 \mu\text{m}$  et  $S = 175 \pm 3 \mu\text{m}$   
 (a) : vue de face (magnification 100X) et (b) : vue de face (magnification 500X).

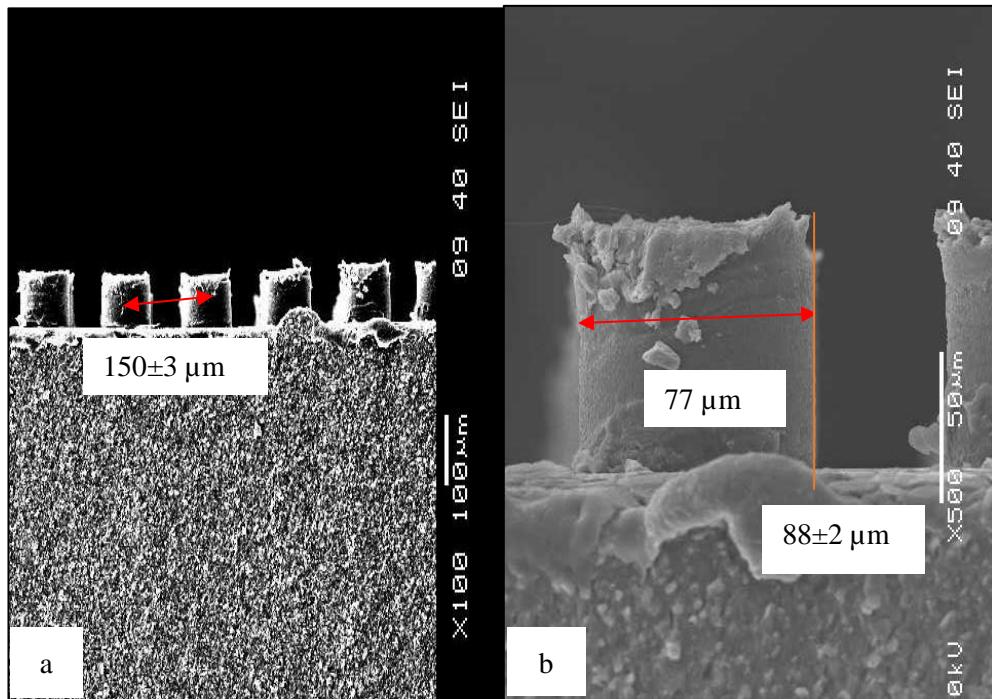


Figure 4. 14: Image MEB de hauteur du pilier du Kapton ( $122 \mu\text{m}$ ) et  $d = 100 \mu\text{m}$ ,  $S = 125 \pm 3 \mu\text{m}$ , (a) : vue de face (magnification 100X) et (b) : vue de face (magnification 500X).

### 4.3. Étude de la mouillabilité de la surface

Les mesures de l'angle de contact pour chaque micro-structure répliquée ont été répété 5 fois. Par la suite, la valeur moyenne de ces valeurs a été prise. Pour cela, l'angle de contact a été mesuré pour un diamètre de gouttelette de 2,67 mm et de 3,37 mm correspondant aux volumes 10 et 20  $\mu\text{l}$  respectivement. Par la suite, la mesure de l'angle de contact a été faite grâce au goniomètre.

Dans cette section, la présentation de nos résultats se fait en examinant l'effet des paramètres des micro-structures sur l'CA et l'CAH, comme illustré aux figures 4.15-4.18 pour les surfaces des micro-structures avec les diamètres de 100  $\mu\text{m}$  et de 75  $\mu\text{m}$  respectivement.

Dans la figure 4.15, les surfaces micro-structurées fabriquées sont des surfaces hydrophobes, ayant un CA déroulé entre  $136^\circ$ - $149^\circ$  et CA varié dans la plage  $131^\circ$ - $147^\circ$   $V=10 \mu\text{l}$  et  $20 \mu\text{l}$  respectivement. Alors, donc ces résultats confirment les calculs théoriques présentés ci-dessus, car il semble qu'avec l'augmentation de (S), provoque l'augmentation de CA et la diminution de CAH, car il y a plus de poche d'air entre les piliers, cela peut empêcher la pénétration de la gouttelette d'eau. L'effet du diamètre de la goutte d'eau est évidemment négligeable sur l'CA et l'CAH, car le diamètre de la gouttelette d'eau est inférieur à la longueur capillaire  $D < l_c$  ( $l_c = \sqrt{\frac{\gamma_{LG}}{\rho}} = 8 \text{ mm}$  [57]). Sachant que :

$$\gamma_{LG} : \text{la tension superficielle du gaz liquide} = 72 \cdot 10^{-3} \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$\rho : \text{la densité de l'eau} = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}.$$

En revanche, les surfaces micro-structurées de 75  $\mu\text{m}$  du diamètre sont des surfaces superhydrophobes avec un  $CA > 150^\circ$  et  $CAH < 10^\circ$ . Il est à noter que, lorsque S augmentait, CA augmentait et CAH diminuait jusqu'à  $(S) = 150 \mu\text{m}$ , grâce à l'état non mouillant de Cassie-Baxter qui pourrait favoriser un air entre les piliers [10,15,16, 25-27]. Ensuite, l'angle de contact diminuait lorsque S augmente. L'explication plausible c'est que : plus que  $S = 175 \mu\text{m}$ , la transition de Cassie-Baxter à Wenzel pourrait se produire [28, 30, 31, 34].

Les figures 4.17 et 4.18 illustrent l'effet de variation de l'espacement centre à centre du pilier de la micro-structure sur le CA et le CAH pour le Kapton (Ka) avec un volume de gouttelette de 10 et 20  $\mu\text{l}$  respectivement et un diamètre de 100  $\mu\text{m}$ . Il existe une tendance perturbée pour le Kapton pour les deux épaisseurs en raison des résidus attachés sur la surface.

En revanche, pour l'aluminium nous n'observons pas cette perturbation sur l'angle de contact où bien sur l'hystérésis de l'angle de contact.

Une étude comparative a été effectuée dans le but de comprendre la cause de la perturbation de l'angle de contact ainsi que l'hystérésis de l'angle de contact. Cette étude comporte les valeurs de l'angle de contact ainsi que le régime pour toutes les micro-structures de Kapton et de l'aluminium comme il est mentionné dans le tableau 4.3. La façon du calcul des angles de contact ainsi que la prédiction d'état de mouillage sont mentionnées dans l'article [56]. Une relation directe émerge théoriquement entre l'angle de contact et l'espacement centre à centre du pilier pour toutes les micro-structures, de sorte que le CA augmente lorsque (S) augmente. De plus, le régime obtenu empiriquement pour toutes les micro-structures c'est le régime de Cassie-Baxter car l'angle de contact après la texturation de surface a été augmenté. Cependant, théoriquement, un régime de Cassie Baxter à partir de l'espacement centre à centre du pilier de : 175, 225 et 200  $\mu\text{m}$  pour le Kapton d'épaisseur 50,9  $\mu\text{m}$ , 122  $\mu\text{m}$  et de l'aluminium respectivement.

Alors, d'après nos résultats les micro-structures ayant un diamètre de 75  $\mu\text{m}$  sont des surfaces superhydrophobes puisqu'il y a moins contact entre le liquide (la gouttelette d'eau) et la surface solide (micro-structure) par rapport les micro-structures ayant un diamètre de 100  $\mu\text{m}$ . Cette zone de contact réduite pourrait empêcher la pénétration de la gouttelette entre les piliers.

Tableau 4. 3: Valeurs des angles de contact théoriques et les régimes théoriques et expérimentaux.

b ( $\mu\text{m}$ )	Kapton 70 $\mu\text{m}$			Kapton 120 $\mu\text{m}$			Al 90 $\mu\text{m}$		
	$\Theta(^{\circ})$	$\beta$ (theoretical)	$\beta$ (experimental)	$\Theta(^{\circ})$	$\beta$ (theoretical)	$\beta$ (experimental)	$\Theta(^{\circ})$	$\beta$ (theoretical)	$\beta$ (experimental)
125	100,56	Wenzel	Cassie Baxter	96,69	Wenzel	Cassie Baxter	98,62	Wenzel	Cassie Baxter
150	110,24	Wenzel	Cassie Baxter	103,60	Wenzel	Cassie Baxter	106,59	Wenzel	Cassie Baxter
175	117,46	Cassie Baxter	Cassie Baxter	109,48	Wenzel	Cassie Baxter	113,67	Wenzel	Cassie Baxter
200	124,39	Cassie Baxter	Cassie Baxter	114,49	Wenzel	Cassie Baxter	119,01	Cassie Baxter	Cassie Baxter
225	127,32	Cassie Baxter	Cassie Baxter	118,47	Cassie Baxter	Cassie Baxter	122,89	Cassie Baxter	Cassie Baxter
250	133,81	Cassie Baxter	Cassie Baxter	124,48	Cassie Baxter	Cassie Baxter	129,46	Cassie Baxter	Cassie Baxter
275	137,79	Cassie Baxter	Cassie Baxter	127,90	Cassie Baxter	Cassie Baxter	133,49	Cassie Baxter	Cassie Baxter
300	139,66	Cassie Baxter	Cassie Baxter	130,66	Cassie Baxter	Cassie Baxter	135,54	Cassie Baxter	Cassie Baxter

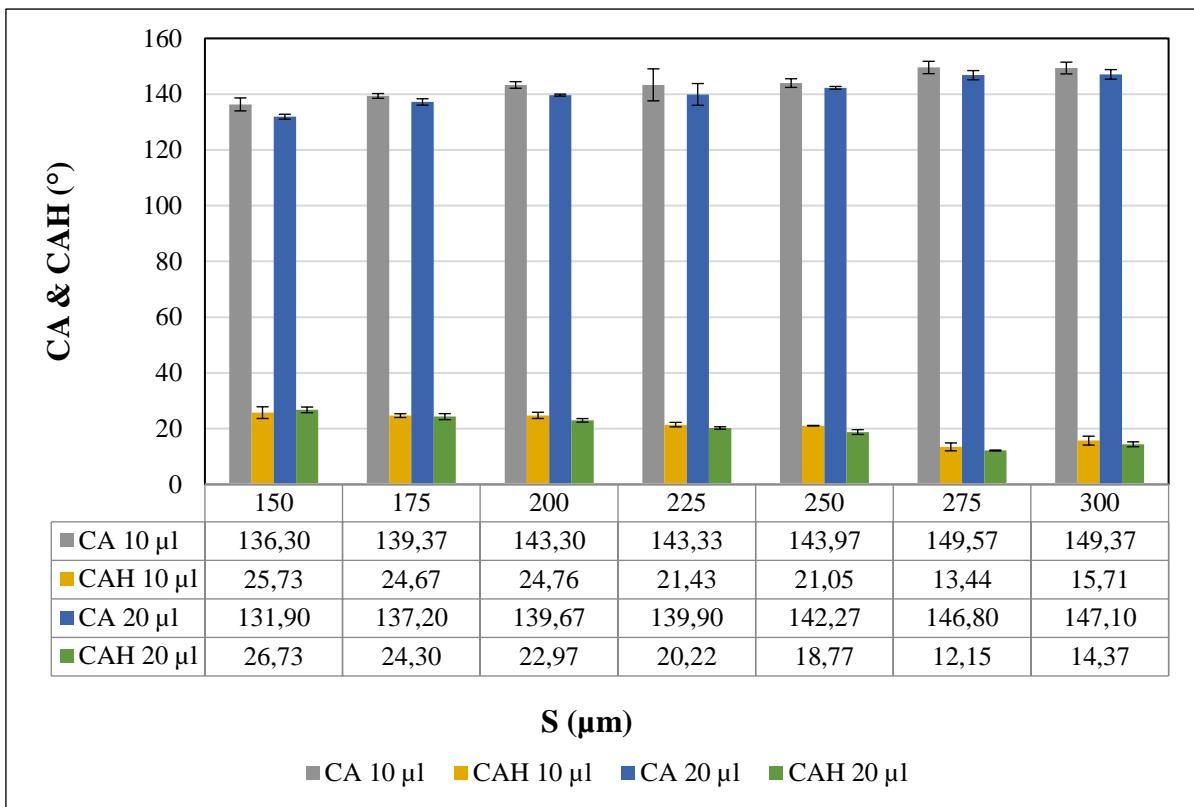


Figure 4. 15: Effet des paramètres du pilier sur l'CA et CAH pour les gouttelettes d'eau,  $d=100 \mu\text{m}$ .

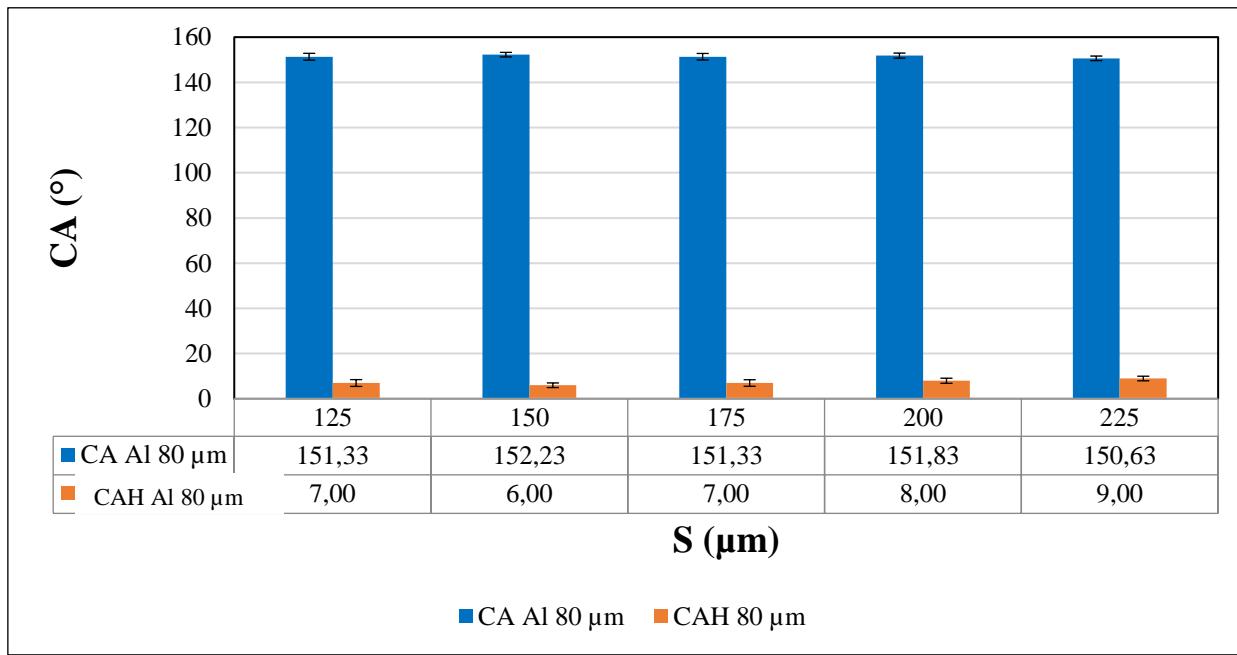


Figure 4.16: Effet des paramètres du pilier sur l'CA et CAH pour les gouttelettes d'eau, avec  $V=20 \mu\text{l}$  et  $d=75 \mu\text{m}$ .

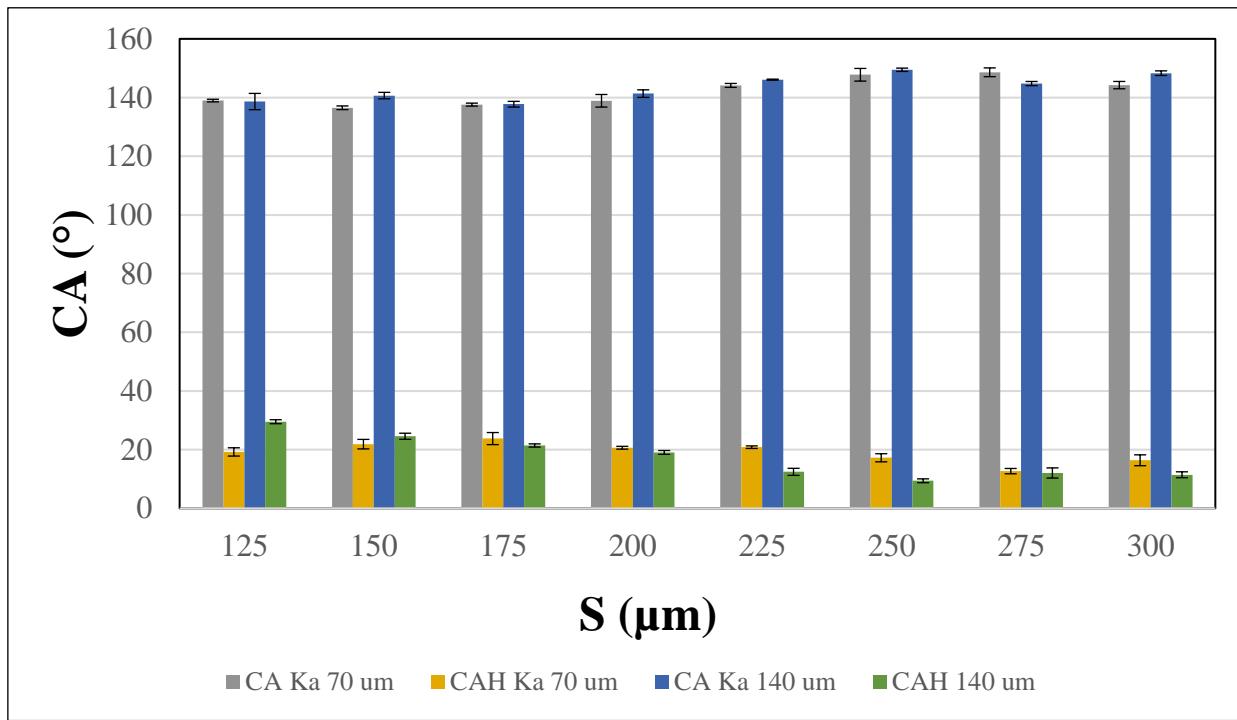


Figure 4.17: Effet des paramètres du pilier sur l'CA et CAH pour les gouttelettes d'eau, avec  $V=10 \mu\text{l}$  et  $d=100 \mu\text{m}$ .

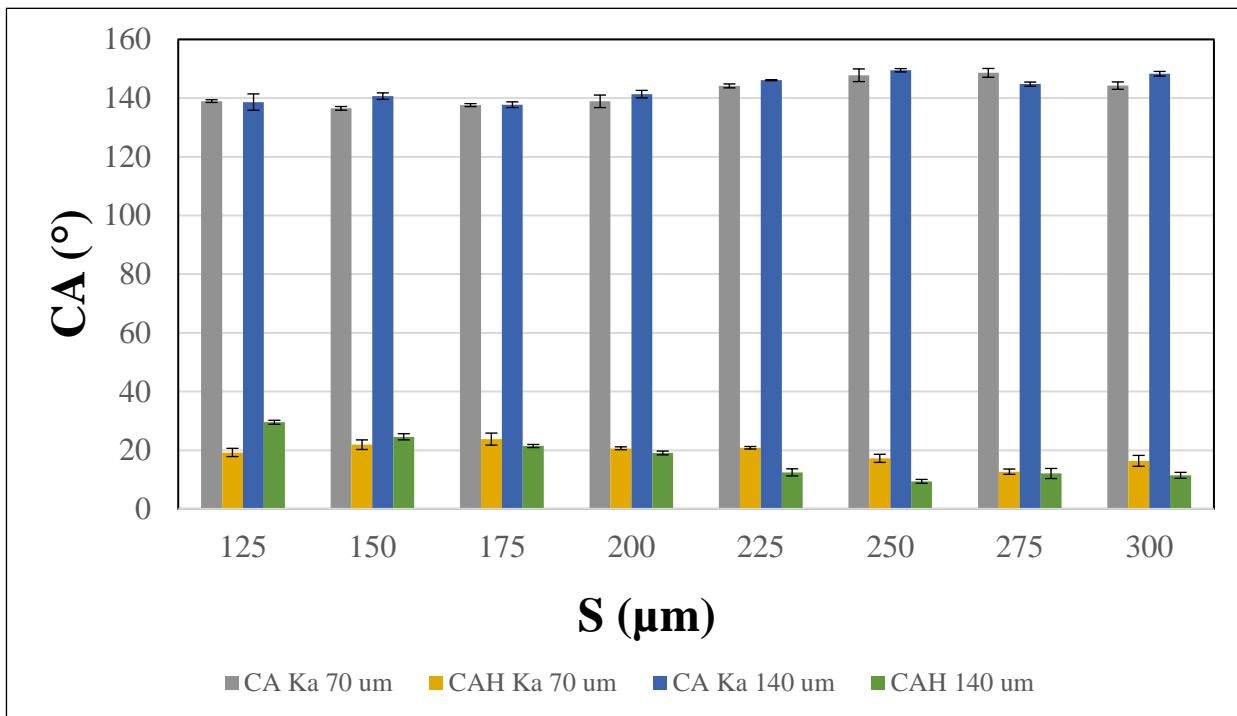


Figure 4.18: Effet des paramètres du pilier sur l'CA et CAH pour les gouttelettes d'eau, avec  $V=20 \mu\text{l}$  et  $d=100 \mu\text{m}$ .

## Conclusion

Des surfaces micro-structurées de PDMS à base du kapton et de l'aluminium ont été obtenus, grâce à la combinaison des surfaces des micro-trous (machine CNC) et leur réplication (moulage par compression). En modifiant trois paramètres opératoires au même temps ( $d$ ,  $S$  et  $h$ ).

La qualité des surfaces micro-structurées de PDMS à base de l'aluminium est meilleure que celles à base de kapton, en raison des résidus qui restaient attachés sur la surface du kapton dû à la force électrostatique.

Par conséquent, Les surfaces obtenues se divisent en deux catégories :

- Des surfaces superhydrophobes avec  $CA > 150^\circ$  et  $CAH < 10^\circ$ , sachant que :  $d=75 \pm 4 \mu\text{m}$ ,  $h=90 \pm 2 \mu\text{m}$  et  $S= (125 \pm 2 - 225 \pm 3 \mu\text{m})$ . Ces surfaces présentent une mouillabilité faible et une déperlançabilité élevée de la gouttelette.
- Des surfaces hydrophobes avec  $CA < 150^\circ$  et  $CAH > 20^\circ$  pour toutes les micro-structures ayant un  $d=100 \pm 3 \mu\text{m}$ .

## CHAPITRE 5

### ÉTUDE DU COMPORTEMENT DE LA GOUTTELETTE D'EAU

#### Introduction

Lors de l'étude du comportement de la gouttelette d'eau sur une surface micro-structurée, de multiples phénomènes ont été observés tels que : le rebondissement complet, le rebondissement partiel, l'éclaboussure rapide, la récession de rupture, le jet singulier et la déposition. Ainsi, les effets des variations du diamètre de la gouttelette et de la vitesse d'impact sur ces phénomènes ont été mesurés dans ce chapitre.

La figure 5.1 présente les différents comportements de la gouttelette d'eau impactant sur la surface micro-structurée. Sachant que :

- $h = 90 \mu\text{m}$
- $S = 125 \mu\text{m}$ .
- $d = 75 \mu\text{m}$  pour le comportement du rebondissement complet, et de  $100 \mu\text{m}$  pour les autres comportements.

Les chiffres de 1 à 4 représentent les moments suivants de la gouttelette : avant de l'impact, au moment de l'impact, la diffusion maximale de la gouttelette et le comportement de gouttelette respectivement.

Les lettres de  $A_i$  à  $F_i$  comprennent différents nombres de Weber vis-à-vis aux comportements des gouttelettes, dont :

$We < 20$ ,  $We < 20$ ,  $10 < We < 60$ ,  $60 < We < 80$  et  $We > 100$  et  $60 < We < 80$  respectivement.

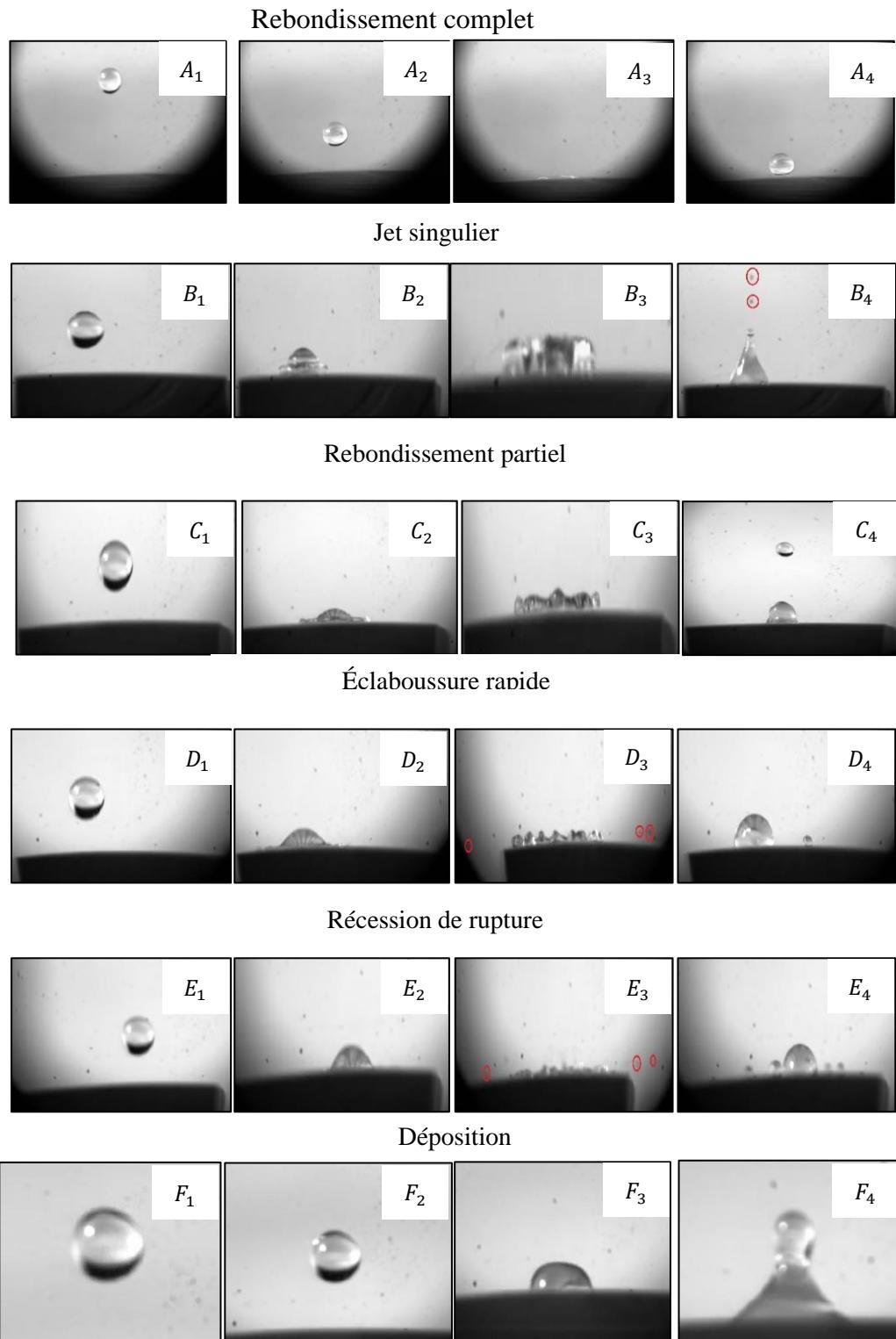


Figure 5. 1: Images de différents comportements de la gouttelette d'eau pour une surface micro-structurée pour un volume de gouttelette de 10  $\mu\text{l}$ .

### 5.1. Calcul de la vitesse de l'impact

Pour mesurer les vitesses de l'impact, tout d'abord la hauteur de la chute de la gouttelette sur la surface micro-structurée a été déterminée. Ensuite, deux différentes positions de la chute en fonction du temps ont été capturées. À ce niveau-là, la hauteur de chaque position par le logiciel ImageJ a été mesurée. Le temps exact est pris de la séquence vidéo à la position correspondante et la courbe est donc tracée.

$$h=f(t)$$

Équation 5. 1

Cette courbe (A. IV. 1) correspond à une droite descendante sous la forme  $ax + b$ . La vitesse d'impact correspond à la pente de la droite notée (a) dans l'équation.

### 5.2. Étude du comportement de la gouttelette d'eau sur les surfaces micro-structurées

Dans ces expériences, les conditions extérieures réelles d'impact des gouttelettes seront examinées, en choisissant un volume de 10  $\mu\text{l}$  ( $D= 2,7 \text{ mm}$ ) et 20  $\mu\text{l}$  ( $D= 3,4 \text{ mm}$ ) correspondant respectivement à des pluies légères et modérées [58,59]. L'effet de la taille de gouttelette sur le comportement de gouttelette d'eau est étudié en changeant le diamètre de l'aiguille de seringue. En Outre l'effet du nombre de We est obtenu en changeant la vitesse (différentes positions de l'aiguille de seringue) comme il est expliqué dans le chapitre 3 (Matériels et méthodes).

#### 5.2.1. Comportement de la gouttelette d'eau pour un volume de 10 $\mu\text{l}$

Dans cette partie, l'étude du comportement de la gouttelette d'eau heurte sur les micro-structures de PDMS sera décrit. Ces micro-structures sont à base du kapton 50,9, 122 ayant un diamètre de pilier de 100  $\mu\text{m}$ , ainsi que à base de l'aluminium 80  $\mu\text{m}$  pour deux diamètres soient : 100 et 75  $\mu\text{m}$ .

Les figures 5.2, 5.4-5.6 élucident l'effet de la variation de l'espacement centre à centre sur le comportement de la gouttelette d'eau pour différents nombres de Weber (différentes vitesses d'impact) pour le Kapton d'épaisseur 50,9  $\mu\text{m}$ , le Kapton d'épaisseur 122  $\mu\text{m}$  et l'aluminium ayant un diamètre de 75  $\mu\text{m}$  et 80  $\mu\text{m}$  d'épaisseur respectivement.

L'interprétation des résultats sera dans la partie de l'effet de topographie de micro-structure, l'effet du substrat et l'effet de la taille de gouttelette.

### **5.2.1.1. Comportement de la gouttelette d'eau sur les surfaces superhydrophobes**

Sur les surfaces superhydrophobes, il existe de cinq différents comportements dynamiques de la gouttelette qui sont : le rebondissement complet, le rebondissement partiel, le jet singulier, la déposition ainsi que la récession de rupture (figure 5.2). L'interprétation des résultats sera présentée dans la partie de l'effet topographique de la micro-structure, l'effet du substrat et l'effet de la taille de gouttelette. La figure 5.3 montre la variation du nombre de Re (compare l'énergie cinétique à l'énergie de viscosité) en fonction du nombre de We. Vu que le liquide n'était pas changé, il suffit de présenter la courbe  $Re = f(We)$  pour les micro-structures ayant  $S = 125-150 \mu\text{m}$ .

Des essais d'impact avec la chute de la gouttelette d'eau heurtent les micro-structures de  $75 \mu\text{m}$  du diamètre ont montré que le rebondissement complet s'est produit sur les surfaces suivantes : lorsque  $S = 125-150 \mu\text{m}$ , où le nombre de (We) est inférieur à 20 comme et  $Re < 1230$  comme il est illustré à la figure 5.3. Le rebondissement partiel s'observe pour toutes les micro-structures ( $150 < S < 225$ ) qui correspondent au  $We < 200$ . Ce comportement serait restreint avec l'augmentation de (S). Ce résultat peut expliquer comment la pénétration partielle de la gouttelette d'eau entre les piliers peut empêcher l'obtention du rebondissement complet pour des surfaces régulières de  $10 \mu\text{l}$  de volume et de  $S \geq 150 \mu\text{m}$  [29-30].

Le jet singulier est présent lorsque  $We < 15$  avec une micro-structure de  $225 \mu\text{m}$  d'espacement centre à centre du pilier. Le phénomène de la déposition est remarqué dans le cas des micro-structures ayant un  $S = 200-225 \mu\text{m}$ , avec un nombre de  $40 < We < 100$ . En revanche, la récession de rupture est observée pour la totalité des micro-structures lorsque  $We > 120$ . Il est bien noté que la probabilité que ce comportement apparaisse augmente avec l'augmentation de (S).

### **5.2.1.2. Comportement de la gouttelette d'eau sur les surfaces hydrophobes**

Il s'agit de la totalité des micro-structures ayant un diamètre de  $100 \mu\text{m}$ .

#### **5.2.1.2.1. Effet de la hauteur des piliers de $70 \mu\text{m}$**

Quatre différents comportements de la gouttelette d'eau sur les micro-structures de Kapton ont été remarqué (figure 5.4). Ces comportements varient avec la variation de la vitesse d'impact. Ainsi, le rebondissement devient partiel si seulement une partie de la gouttelette rebondi ce qui pourrait être déterminant dans le cas suivant :  $We < 150$ . À ce niveau-là, la probabilité d'avoir ce comportement augmente avec la diminution du (S). En revanche, une fragmentation de la gouttelette permet de décrire le comportement de la récession de rupture. Ce comportement est dominant dans

le cas du  $We > 150$ . Un phénomène d'éclaboussure rapide est remarqué dans le cas du  $We > 80$ . Ce comportement aboutit à la génération de petites gouttelettes au niveau de la ligne de contact qui est parallèle au substrat au moment d'impact. La déposition de la gouttelette sur la micro-structure se présente lorsque  $We < 80$ , pour les micro-structures ayant  $S \geq 225 \mu m$ .

#### **5.2.1.2.2. Effet de la hauteur des piliers de 90 $\mu m$**

Dans le cas de l'aluminium, il existe quatre différents comportements de gouttelette d'eau sur les micro-structures (figure 5.6). En effet, le rebondissement partiel s'observe pour la quasi-totalité des micro-structures ( $150 < S < 225$ ) qui correspondent au  $We < 230$ . Il a été observé que la présence de ce comportement diminue avec l'augmentation de ( $S$ ). La déposition s'observe lorsque  $We < 80$  pour les micro-structures ayant  $S=[225, 250, 275 \text{ et } 300 \mu m]$ . L'autre comportement, qui est la récession de rupture, s'observe dans les cas où  $We$  est élevé ( $We > 200$ ). Cependant, l'éclaboussure rapide pourrait être observée lorsque ( $50 < We < 100$ ) seulement pour les micro-structures ayant  $S=[275 \text{ et } 300 \mu m]$ .

#### **5.2.1.2.3. Effet de la hauteur des piliers de 140 $\mu m$**

Dans ce cas, cinq différents comportements de gouttelette d'eau sur les micro-structures de Kapton ont été observé (figure 5.5). Ces comportements varient avec la variation de la vitesse d'impact. D'une part, le rebondissement partiel est observé dans le cas où  $We < 150$ . D'autre part, le jet singulier se présente lorsque  $We < 20$ . Par contre, la déposition s'observe lorsque :  $50 < We < 150$ . Ensuite, la récession de rupture qui pourrait être dominante dans le cas du  $We > 200$ . D'ailleurs, l'éclaboussure rapide se présente lorsque  $150 < We < 200$ . Alors, avec des piliers plus gros de 140  $\mu m$ , des comportements plus variés peuvent être remarqués dans ce cas par rapport au cas des hauteurs de 70  $\mu m$  et de 90  $\mu m$ . C'est dû au fait que la gouttelette ne pénètre pas complètement dans la structure.

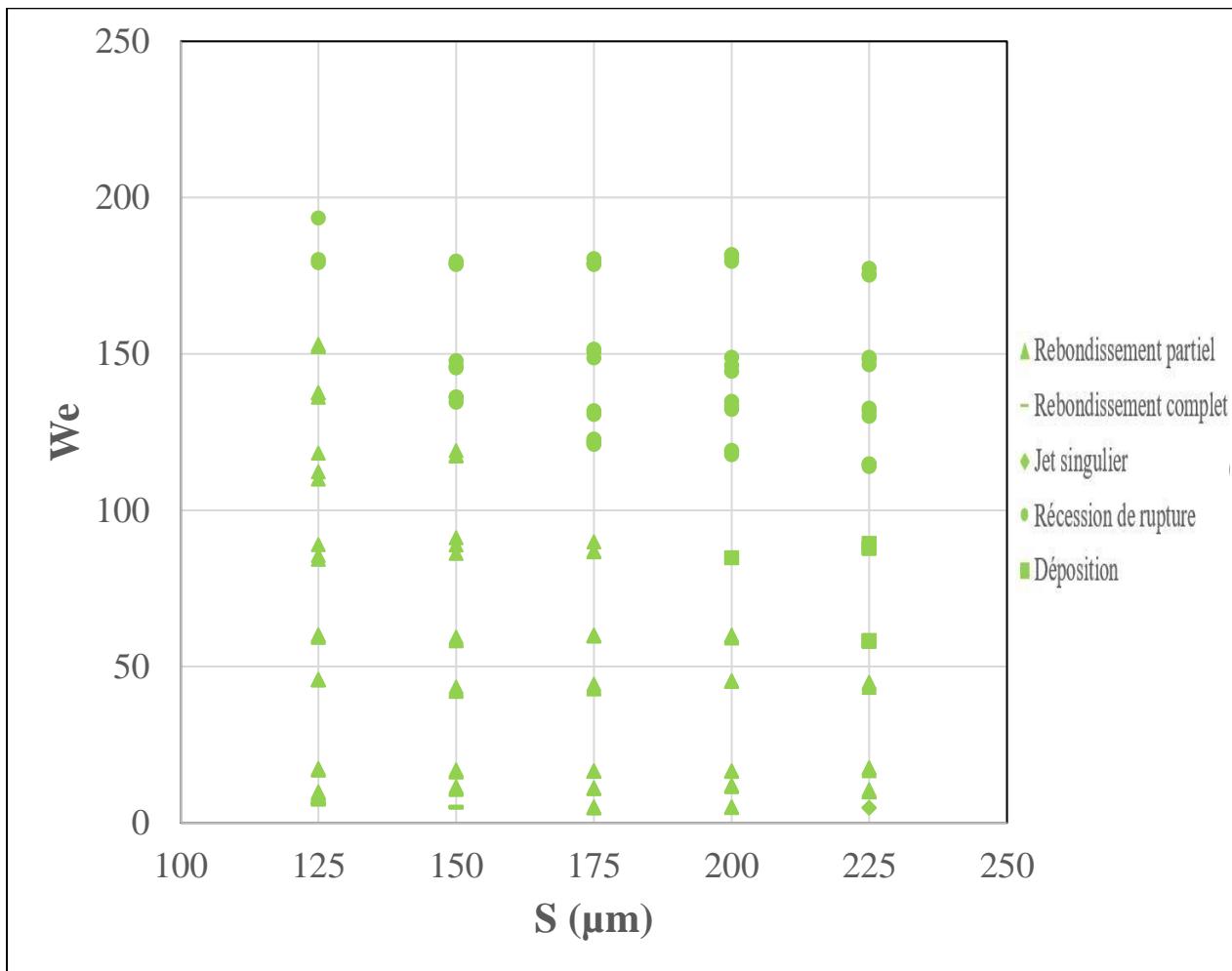


Figure 5.2: Effet de ( $S$ ) sur le comportement de gouttelette d'eau pour  $V= 10 \mu\text{l}$  et  $d= 75 \mu\text{m}$ .

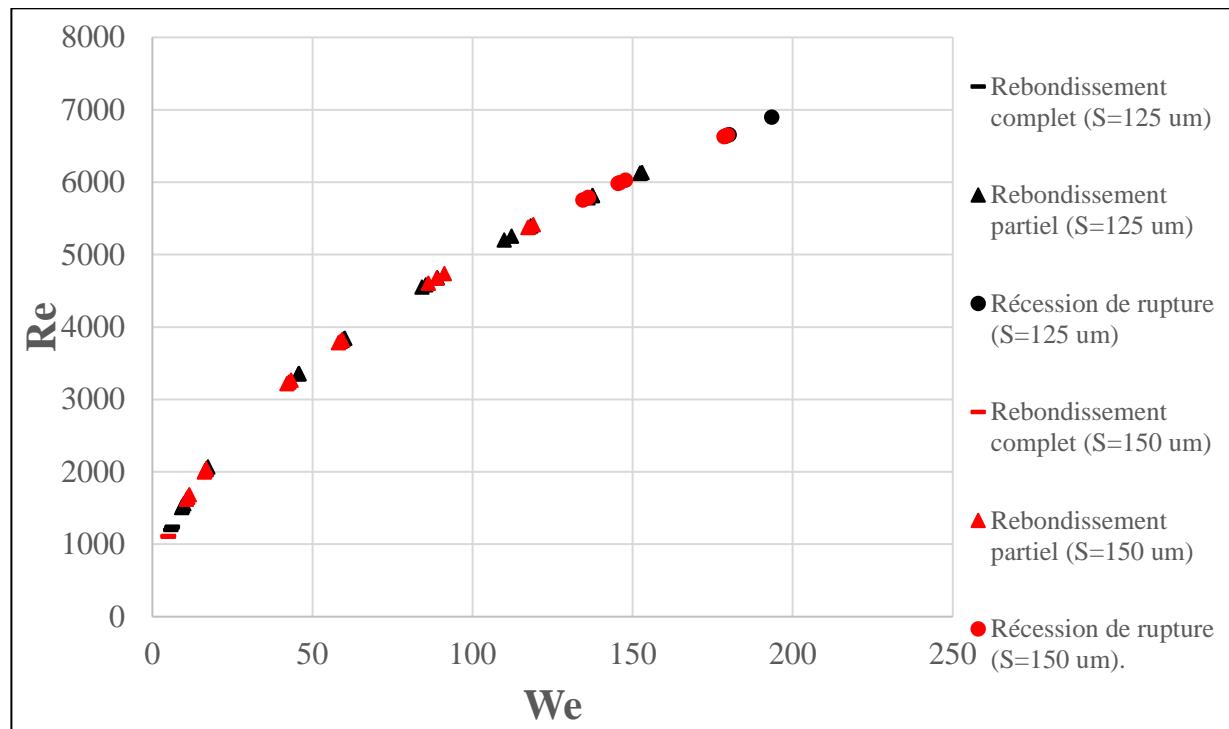


Figure 5. 3: Variation de Re en fonction de We pour la micro-structure ayant :  $d = 78 \pm 4 \mu\text{m}$ ,  $S = 125 \pm 2$  et  $150 \pm 2 \mu\text{m}$  et  $h = 90 \pm 3 \mu\text{m}$ .

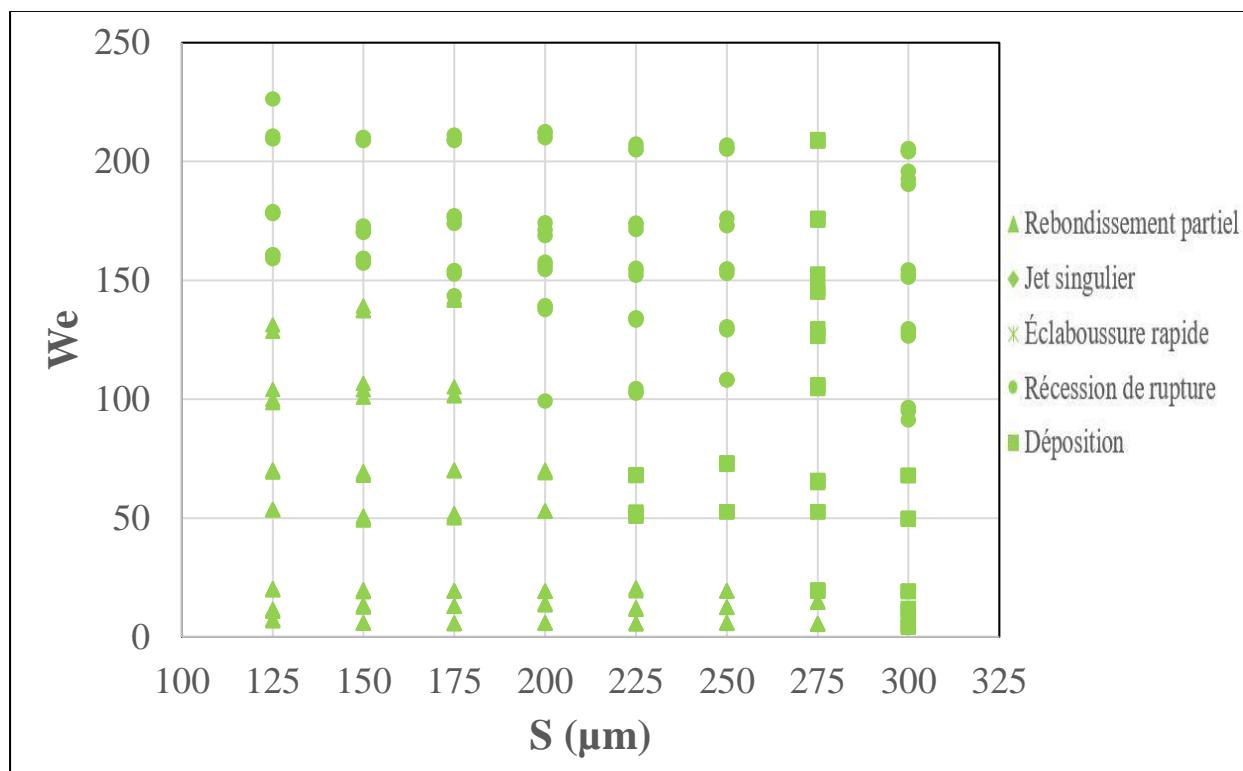


Figure 5. 4: Effet de (S) sur le comportement des gouttelettes d'eau pour  $V = 10 \mu\text{l}$  et  $d = 100 \mu\text{m}$  pour hauteur des piliers de  $70 \mu\text{m}$ .

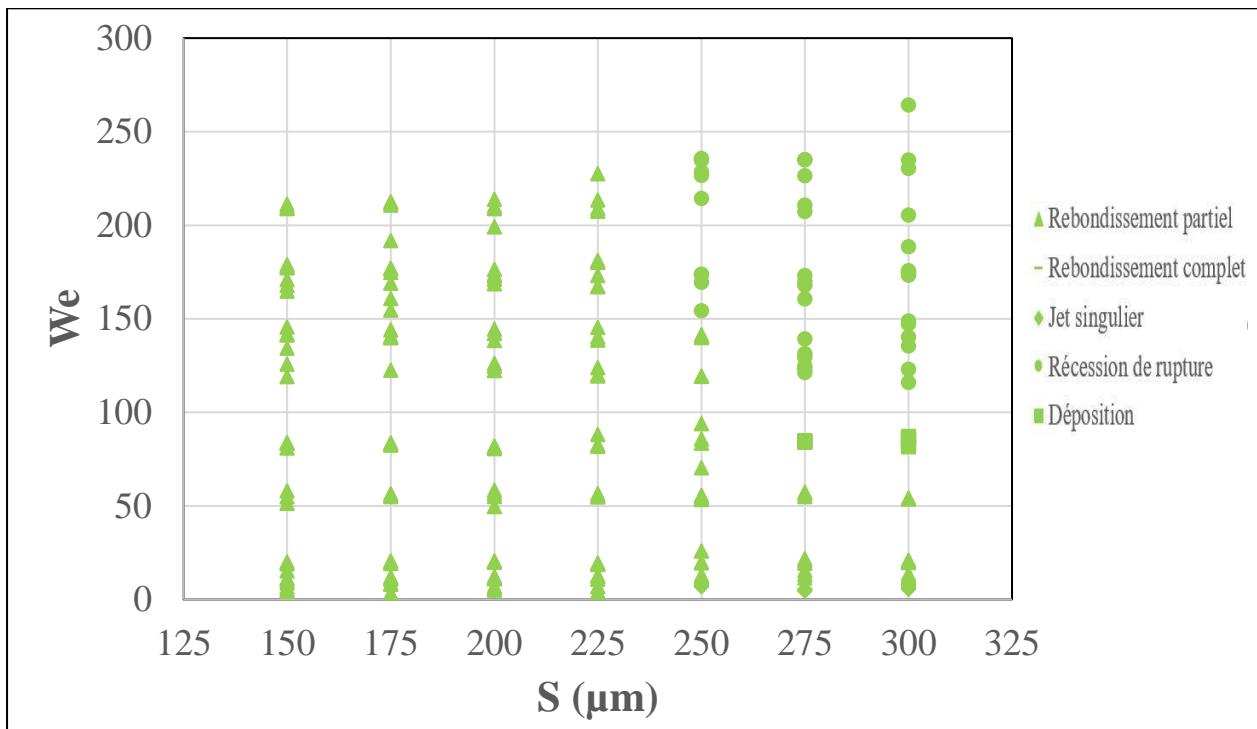


Figure 5.5: Effect of  $(S)$  on the behavior of water droplets for  $V = 10 \mu\text{l}$  and  $d = 100 \mu\text{m}$  pour hauteur des piliers de  $90 \mu\text{m}$ .

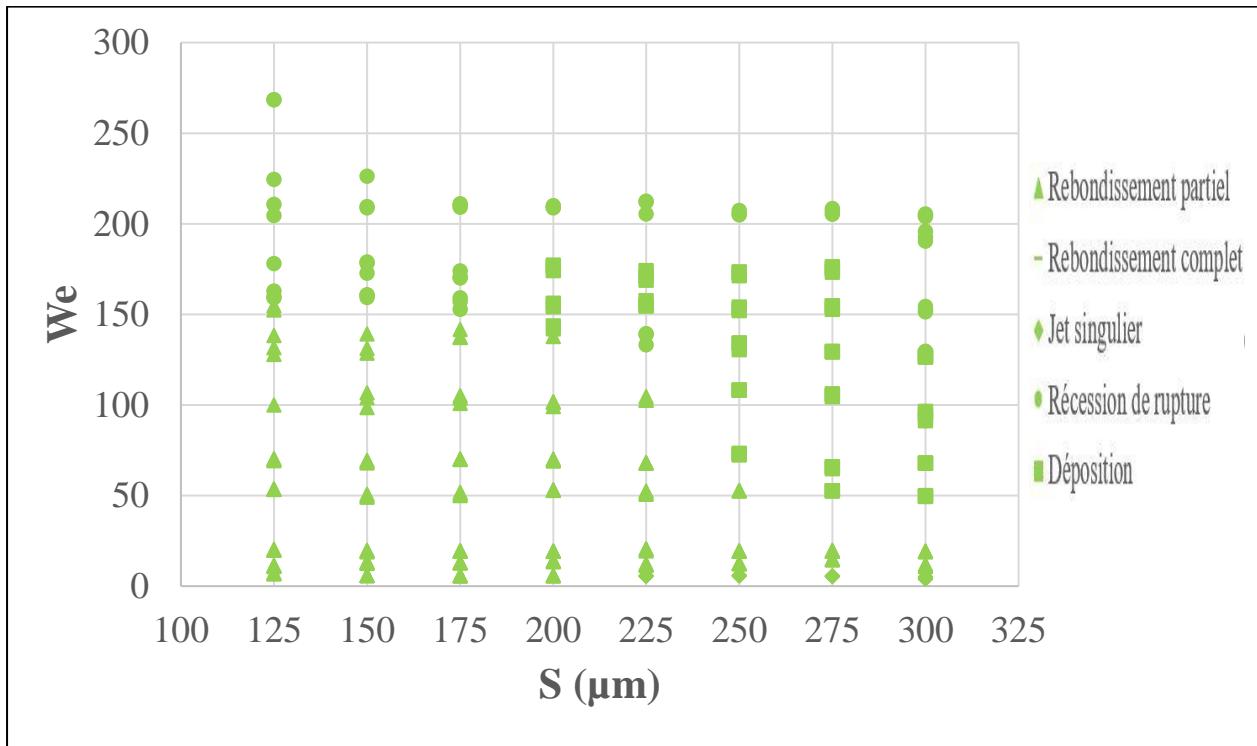


Figure 5.6: Effect of  $(S)$  on the behavior of water droplets for  $V = 10 \mu\text{l}$  and  $d = 100 \mu\text{m}$  pour hauteur des piliers de  $140 \mu\text{m}$ .

#### 5.2.1.2.4. Effet de la topographie de micro-structure

L'espacement centre à centre des piliers (S) et la hauteur du pilier (h) jouent un rôle essentiel dans le comportement des gouttelettes d'eau sur une surface micro-structurée. Il y a plus de poches d'air entre les piliers lorsque la hauteur du pilier est augmentée (Kapton 50,9  $\mu\text{m}$ , Aluminium 80  $\mu\text{m}$  et Kapton 122  $\mu\text{m}$ ), ce qui peut par la suite diminuer la surface de contact entre la gouttelette et la surface, conduisant ainsi à une diminution de la pénétration de la gouttelette entre les piliers.

Comme déjà expliqué, les caractéristiques de la surface ont un effet significatif sur le comportement des gouttelettes. Dans le cas de l'état de Cassie-Baxter, il existe plus de poches d'air entre les piliers, un temps de contact court et une zone de contact réduite entre la gouttelette et la surface. Aussi moins d'énergie serait dissipée après l'impact et il va y avoir plus d'énergie cinétique stockée dans la gouttelette pour pouvoir rebondir sur la surface.

Par exemple, un rebondissement complet s'observe sur la micro-structure ayant un  $S=150 \mu\text{m}$  et  $d= 75 \mu\text{m}$ , mais dans le cas de  $d=100 \mu\text{m}$ , il s'agit d'un rebondissement partiel. D'autre part, pour les micro-structures avec des hauteurs (70  $\mu\text{m}$  et 140  $\mu\text{m}$ ), le rebondissement partiel suit la même tendance ( $We < 150$ ) pour les micro-structures qui ont (S) de 125 à 175  $\mu\text{m}$ . Pour des micro-structures ayant un (S) plus que 200  $\mu\text{m}$ , le comportement de gouttelette commence à varier entre : la déposition ( $We < 70$ ), la récession de rupture ( $We > 100$ ) et l'éclaboussure rapide lorsque  $We > 85$ . Par contre, pour les micro-structures à base d'aluminium, le rebondissement partiel est le comportement le plus dominant, lorsque  $We < 250$  pour les micro-structures qui ont  $150 < S \leq 250$ . En effet, lorsque S varie entre 250 et 300  $\mu\text{m}$  et  $50 < We < 100$ , une récession de rupture a été remarqué. De plus, plusieurs comportements seront possibles à observer tels que l'éclaboussure rapide et la récession de rupture lorsque  $We > 120$ . Il est bien noté qu'il n'existe pas de déposition de la gouttelette d'eau dans le cas où la hauteur des piliers est de 90  $\mu\text{m}$ . Alors, pour toutes les micro-structures où (S) augmente, des valeurs faibles de We auront besoin, d'une part afin d'éviter la récession de rupture ou l'éclaboussure rapide en raison de la cinétique élevée de la gouttelette d'eau. D'autre part, afin d'éviter la déposition de la gouttelette dû à la pénétration de la gouttelette sur la micro-structure. Alors une valeur modérée de  $We < 150$  pour le Kapton fin, et  $We < 250$  pour le kapton épais conduit à un rebondissement partiel. Cependant, un nombre élevé de We conduit soit à une récession de rupture ou à une éclaboussure rapide. Avant l'éclaboussure rapide, un périmètre ondulé était observé dans la figure 5.7. Ce périmètre ondulé interprète l'instabilité de l'interface entre la gouttelette et la micro-structure.

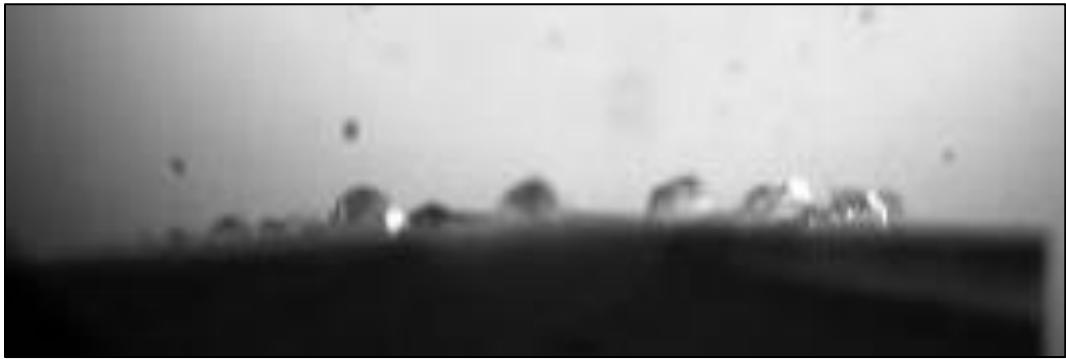


Figure 5. 7: Périmètre ondulé pour un nombre de We de 132 et un (S) de 200  $\mu\text{m}$ .

#### 5.2.1.2.5. Effet du substrat

La nature du substrat (polymère ou métal) pourrait aussi affecter la qualité de la réplication des micro-structures. Cela va affecter le comportement de la gouttelette d'eau. Par exemple, le régime dominant pour les micro-structures à base d'aluminium est le rebondissement partiel, pour les micro-structures ayant (S) moins de 225  $\mu\text{m}$ . En revanche, pour les micro-structures à base de Kapton (50,9 et 122  $\mu\text{m}$ ) le comportement de gouttelette d'eau commence à varier à partir des micro-structures avec un espace S = 200  $\mu\text{m}$ . Alors la nature du masque affecte directement le comportement de gouttelette d'eau à cause des résidus attachés sur les micro-structures qui sont moins présents dans le cas d'aluminium grâce à la résistivité faible par rapport au Kapton.

#### 5.2.2. Comportement de la gouttelette d'eau pour un volume de 20 $\mu\text{l}$

Dans cette partie, une analyse du comportement de la gouttelette d'eau impactant sur les micro-structures de PDMS sera présentée, à base du kapton h=70  $\mu\text{m}$ , h=140  $\mu\text{m}$  et de l'aluminium 90  $\mu\text{m}$  de hauteur, et pour un volume de la gouttelette ainsi augmenté de 20  $\mu\text{l}$ , afin d'analyser son effet sur le comportement dynamique de la gouttelette.

Il s'agit de cinq différents comportements qui sont : le rebondissement complet, le rebondissement partiel, la déposition, la récession de rupture ainsi que l'éclaboussure rapide. Les figures 5.8, 5.9, 5.10 et 5.11 éludent l'effet de la variation de l'espacement centre à centre sur le comportement de la gouttelette d'eau pour différents nombres de Weber (différentes vitesses d'impact).

### **5.2.2.1. Comportement de la gouttelette d'eau sur les surfaces superhydrophobes**

Pour la totalité des micro-structures ayant un diamètre de 75  $\mu\text{m}$ , il s'agit de cinq différents comportements de la gouttelette d'eau sur les micro-structures de PDMS à base des micro-structures de 90  $\mu\text{m}$  de hauteur (figure 5.8). Ces comportements varient avec la vitesse de l'impact. En premier, le rebondissement complet s'observe sur les micro-structures ayant  $S= 125- 175 \mu\text{m}$  avec un nombre de  $W_e < 20$ . Alors que, le rebondissement partiel s'observe pour la totalité des micro-structures dans le cas où  $W_e < 150$ .

D'autre part, le jet singulier est présent lorsque  $W_e < 20$  sur la micro-structure qui y a un  $S= 225 \mu\text{m}$ . Par contre, la récession de rupture pourrait être dominante dans le cas du  $W_e > 150$ .

L'effet de la variation du volume de la gouttelette d'eau sur le comportement dynamique est significatif. Par exemple, 2 comportements ont été remarqué pour une micro-structure régulière de  $S=225 \mu\text{m}$  et  $V=20 \mu\text{l}$ . En revanche, 3 comportements ont été observé pour la même micro-structure ayant un volume de 10  $\mu\text{l}$ . Alors, dans le cas où le volume de la gouttelette est de 20  $\mu\text{l}$ , elle se dépose au lieu de se rebondir dû au fait que la gouttelette n'avait pas une énergie suffisante pour se rebondir.

### **5.2.2.2. Comportement de la gouttelette d'eau sur les surfaces hydrophobes**

Dans cette partie, les comportements de la gouttelette d'eau sur les surfaces de PDMS à base de Kapton 50,9  $\mu\text{m}$ , de Kapton 122  $\mu\text{m}$  et de l'aluminium 80  $\mu\text{m}$  d'épaisseur sera analysés.

#### **5.2.2.2.1. Effet de la hauteur des piliers de 70 $\mu\text{m}$**

Dans ce cas, quatre différents comportements de gouttelette d'eau sur les micro-structures (figure 5.9). Premièrement, le rebondissement partiel s'observe dans le cas où  $W_e < 150$ . Deuxièmement, la récession de rupture pourrait être dominante dans le cas du  $W_e > 150$  pour les micro-structures qui avaient  $S=[125, 150, 175 \text{ et } 200 \mu\text{m}]$ . Par la suite, l'éclaboussure rapide se présente lorsque  $W_e > 80$  pour les micro-structures ayant  $S=[250, 275 \text{ et } 300 \mu\text{m}]$ . La déposition est présente lorsque  $W_e$  est faible ( $30 < W_e < 70$ ) seulement pour les micro-structures ayant  $S=[275 \text{ et } 300 \mu\text{m}]$ , car il n'y a pas assez de poche d'air pour permettre à la gouttelette d'emmagasinier la cinétique nécessaire pour se rebondir.

#### **5.2.2.2.2. Effet de la hauteur des piliers de 80 $\mu\text{m}$**

Le rebondissement partiel se présente pour la quasi-totalité des micro-structures ( $\text{We} < 225$ ) comme il est illustré à la figure 5.10. À cet égard, une relation inverse émerge entre la possibilité d'avoir ce comportement et ( $S$ ). En fait, lorsque ( $S$ ) augmentait, l'apparition du rebondissement partiel diminuait. L'autre comportement qui est la récession de rupture s'observe dans les cas où  $\text{We}$  est élevé ( $\text{We} > 250$ ). À ce stade, la présence de la récession de rupture augmente avec l'augmentation de ( $S$ ).

#### **5.2.2.2.3. Effet de la hauteur des piliers de 122 $\mu\text{m}$**

Quatre différents comportements de gouttelette d'eau sur les micro-structures de Kapton sont présents (figure 5.11). Ces comportements varient avec la vitesse d'impact ainsi, le rebondissement s'observe dans le cas suivant :  $\text{We} < 250$ . À ce niveau-là, si le ( $S$ ) augmente, la probabilité d'avoir le rebondissement partiel diminue. En revanche, dans le cas de de récession de rupture, ce comportement est dominant dans le cas du  $\text{We} > 150$ , pour les micro-structures ayant  $S=[175, 200, 225, 250 \text{ et } 275 \mu\text{m}]$ . Un phénomène d'éclaboussure rapide est remarqué dans le cas du  $\text{We} > 110$ . La déposition de la gouttelette sur la micro-structure s'observe lorsque  $\text{We}$  est faible ( $20 < \text{We} < 80$ ) pour les micro-structures ayant  $S=[275 \text{ et } 300 \mu\text{m}]$ . Cette dernière survient car les poches d'air existantes entre les piliers ne sont pas suffisantes pour permettre à la gouttelette d'emmagasiner la cinétique nécessaire au rebond.

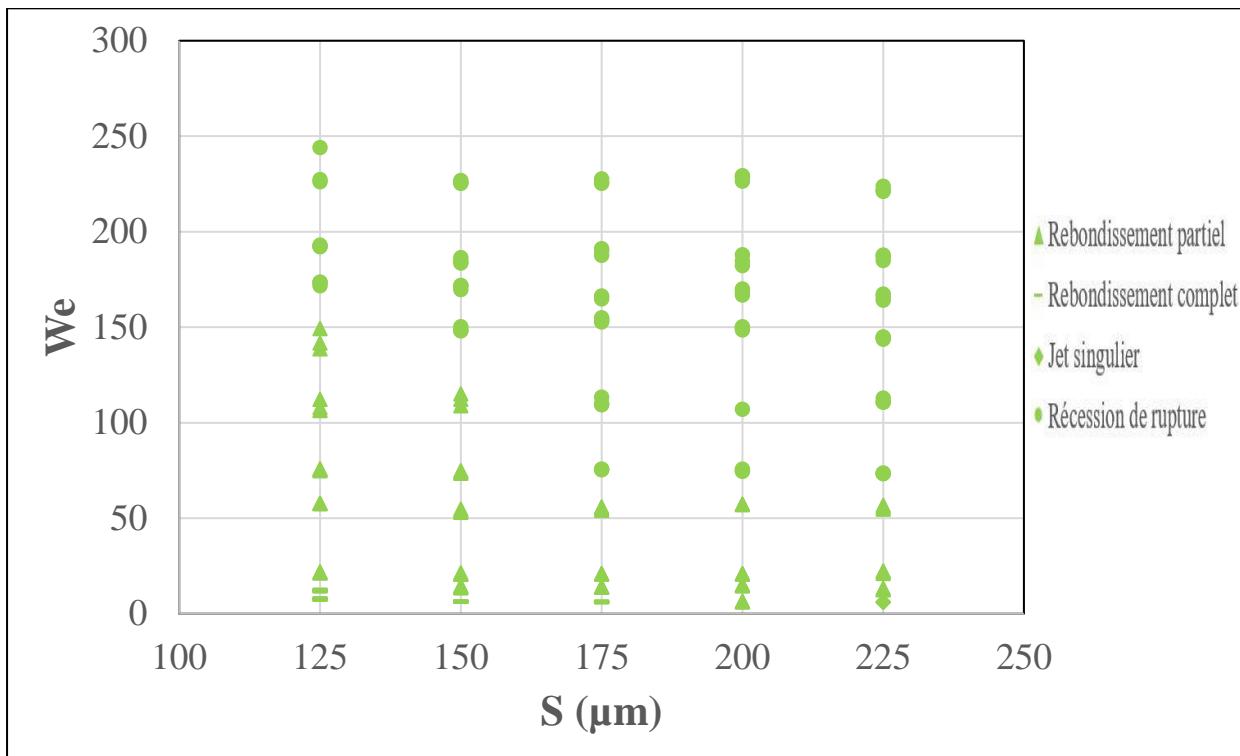


Figure 5. 8: Effet de (S) sur le comportement de gouttelette d'eau pour  $V= 20 \mu\text{l}$  et  $d= 75 \mu\text{m}$ .

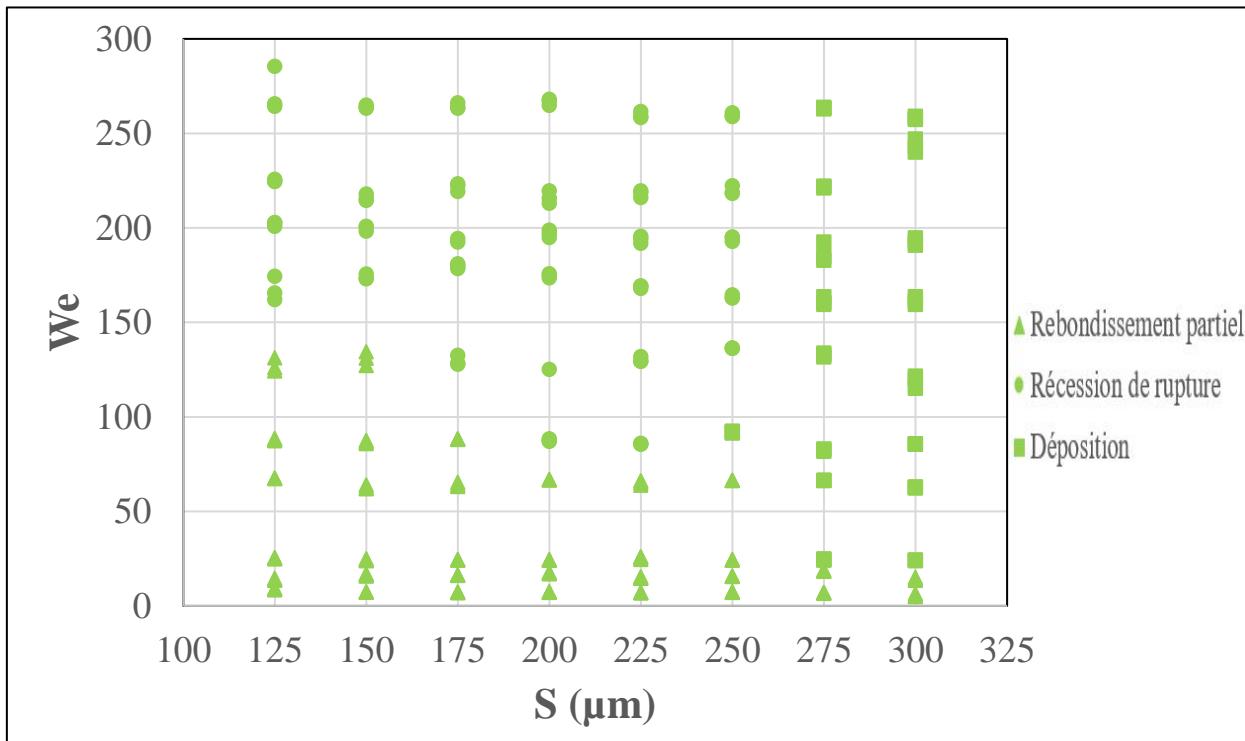


Figure 5. 9: Effet de (S) sur le comportement des gouttelettes d'eau pour  $V= 20 \mu\text{l}$  et  $d= 100 \mu\text{m}$  pour hauteur des piliers de  $70 \mu\text{m}$ .

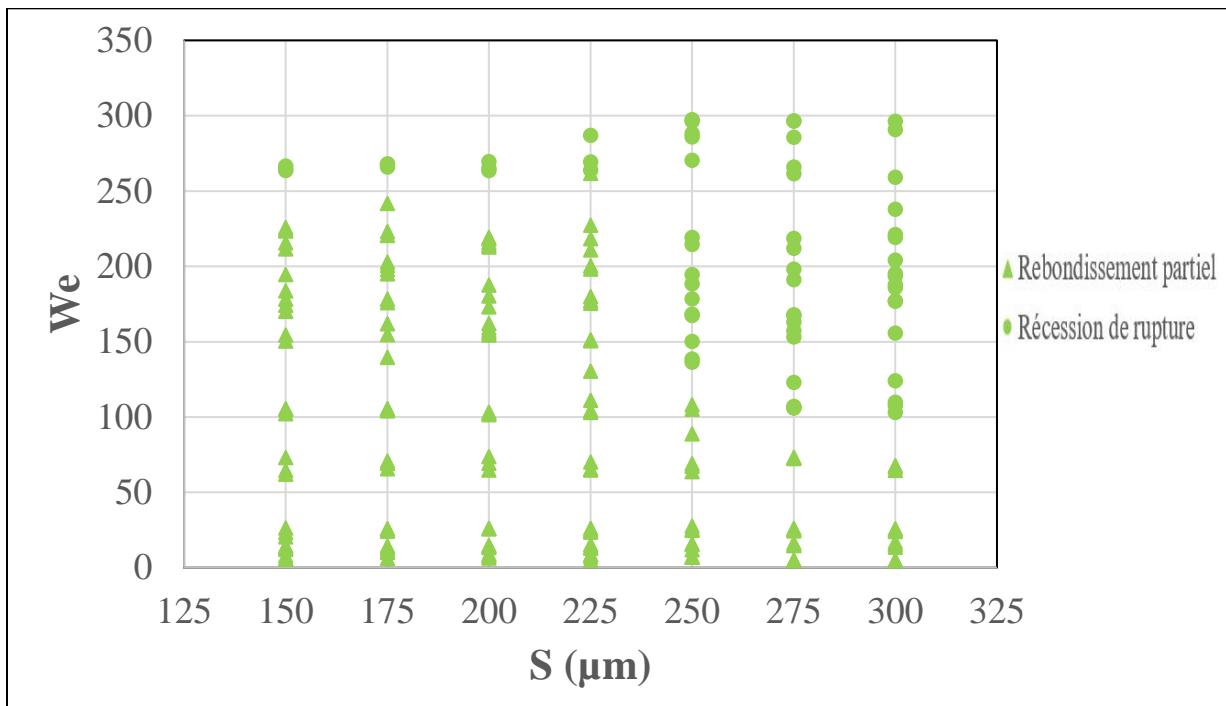


Figure 5. 10: Effet de (S) sur le comportement des gouttelettes d'eau pour  $V= 10 \mu\text{l}$  et  $d= 100 \mu\text{m}$  pour hauteur des piliers de  $90 \mu\text{m}$ .

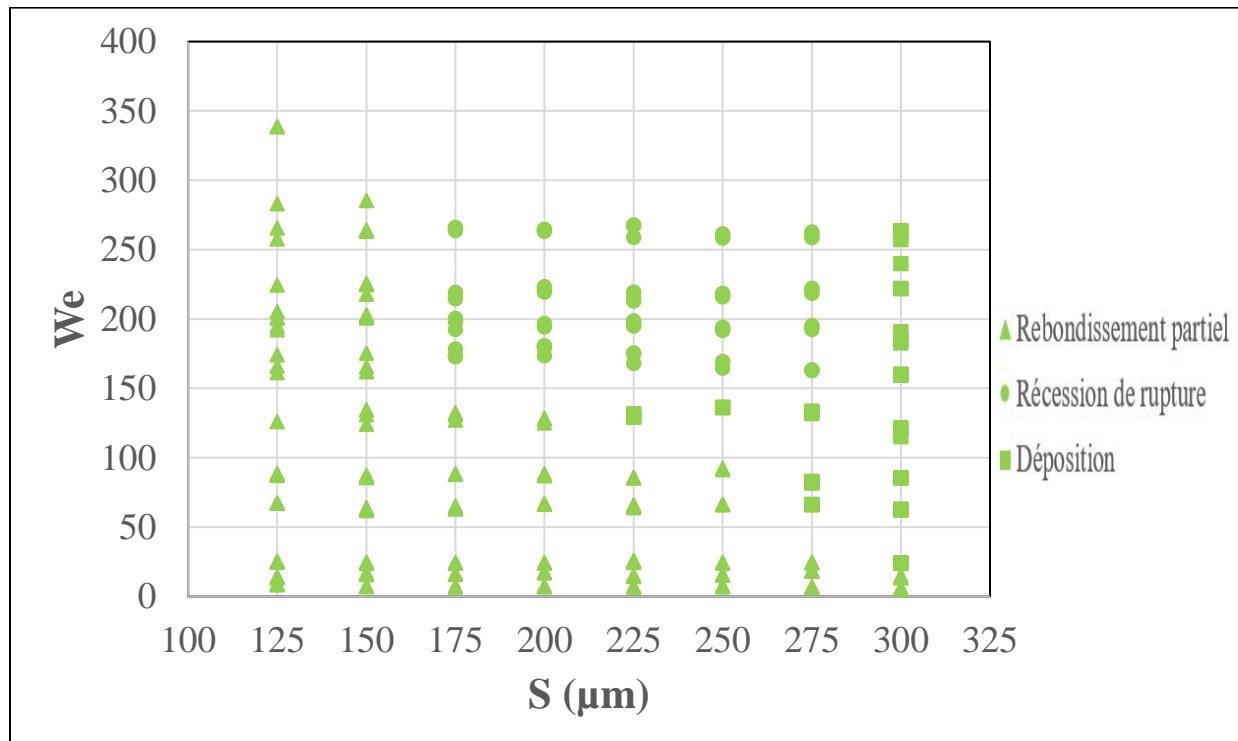


Figure 5. 11: Effet de (S) sur le comportement des gouttelettes d'eau pour  $V= 20 \mu\text{l}$  et  $d= 100 \mu\text{m}$  pour hauteur des piliers de  $140 \mu\text{m}$ .

#### 5.2.2.2.4. Effet de la taille de la gouttelette

Une augmentation de l'énergie cinétique et de la zone de contact entre la gouttelette et la surface suivent l'augmentation du volume des gouttelettes (équation 2.10) par rapport à une gouttelette plus petite. Lorsqu'en augmentant la taille initiale de gouttelette, elle se propage davantage et présente plus d'oscillation pendant le régime de propagation (régime d'étalement) en raison d'une augmentation de l'énergie cinétique ( $E_{C1}$ ). Une augmentation de la surface pendant le régime de propagation pour les gouttelettes plus grosses entraîne la nécessité de plus d'énergie pour le rebondissement de gouttelette en raison de l'augmentation de la masse [10,49,51,52]. Par exemple, pour les micro-structures à base d'aluminium, le rebondissement partiel est le comportement le plus dominant dans le cas du volume de  $10 \mu\text{l}$ , y compris  $\text{We} < 250$  pour les micro-structures ayant  $150 < S \leq 250$ . Par contre, dans le cas où le volume de la gouttelette est de  $20 \mu\text{l}$ , deux comportements seront remarqués tels que : le rebondissement partiel ainsi que la récession de rupture pour les mêmes micro-structures.

### 5.3. Paramètre d'épandage maximal ( $\beta$ )

La figure 5.12 décrit la dépendance de  $\beta$  par rapport au nombre  $\text{We}$  pour les surfaces des micro-structures superhydrophobes, et montre comment  $\beta$  peut changer en modifiant la topographie des surfaces des micro-structures superhydrophobes pour un volume de  $10 \mu\text{l}$ . Comme prévu, une relation directe émerge entre le nombre de  $\text{We}$  et  $\beta$  pour tous les scénarios. Deuxièmement, lorsque  $\text{We}$  est inférieur à 20, le rebondissement complet consiste en une micro-structure régulière de  $S = 125$  et  $150 \mu\text{m}$ , avec  $\beta < 4$ . L'énergie cinétique de ces surfaces est totalement convertie en énergie de surface. Donc, le rebondissement complet se produit lorsque  $\beta$  et  $v_i$  sont faibles (la propagation de la gouttelette frappant la surface et sa cinétique).

Dans la même tendance, le rebondissement partiel est dominant pour les autres micro-structures à cause de la pénétration partielle des gouttelettes d'eau entre les piliers [46-48]. Jusqu'à  $\text{We} < 160$ , le comportement dominant pour la surface avec ( $S = 125 \mu\text{m}$ ) est le rebondissement partiel comprenant  $5 < \beta < 9$ . En revanche, pour les autres surfaces, l'apparition du rebondissement partiel diminue avec l'augmentation ( $\beta$  et  $\text{We}$ ).

Cependant, l'apparition de la désintégration décroissante augmente avec l'augmentation ( $S$ ,  $\beta$  et  $\text{We}$ ). Dans ce régime, l'étalement des gouttelettes a commencé à se séparer de plusieurs petits satellites en raison de l'instabilité de l'interface entre la gouttelette et la micro-structure. Sinon, en

augmentant la vitesse d'impact (l'inertie), la gouttelette se propage davantage et présente plus d'oscillation pendant le régime de propagation (régime d'étalement) en raison d'une augmentation de l'énergie cinétique lorsqu'une valeur élevée se dissipe par la viscosité [16, 47-49].

Donc, une relation directe émerge entre  $\beta$  et le comportement de la gouttelette d'eau impactant la surface micro-structuré. En effet, la probabilité d'avoir le rebondissement diminue avec l'augmentation de  $\beta$ . En revanche, la récession de rupture et l'éclaboussure rapide peuvent être produites lorsque  $\beta$  est élevé.

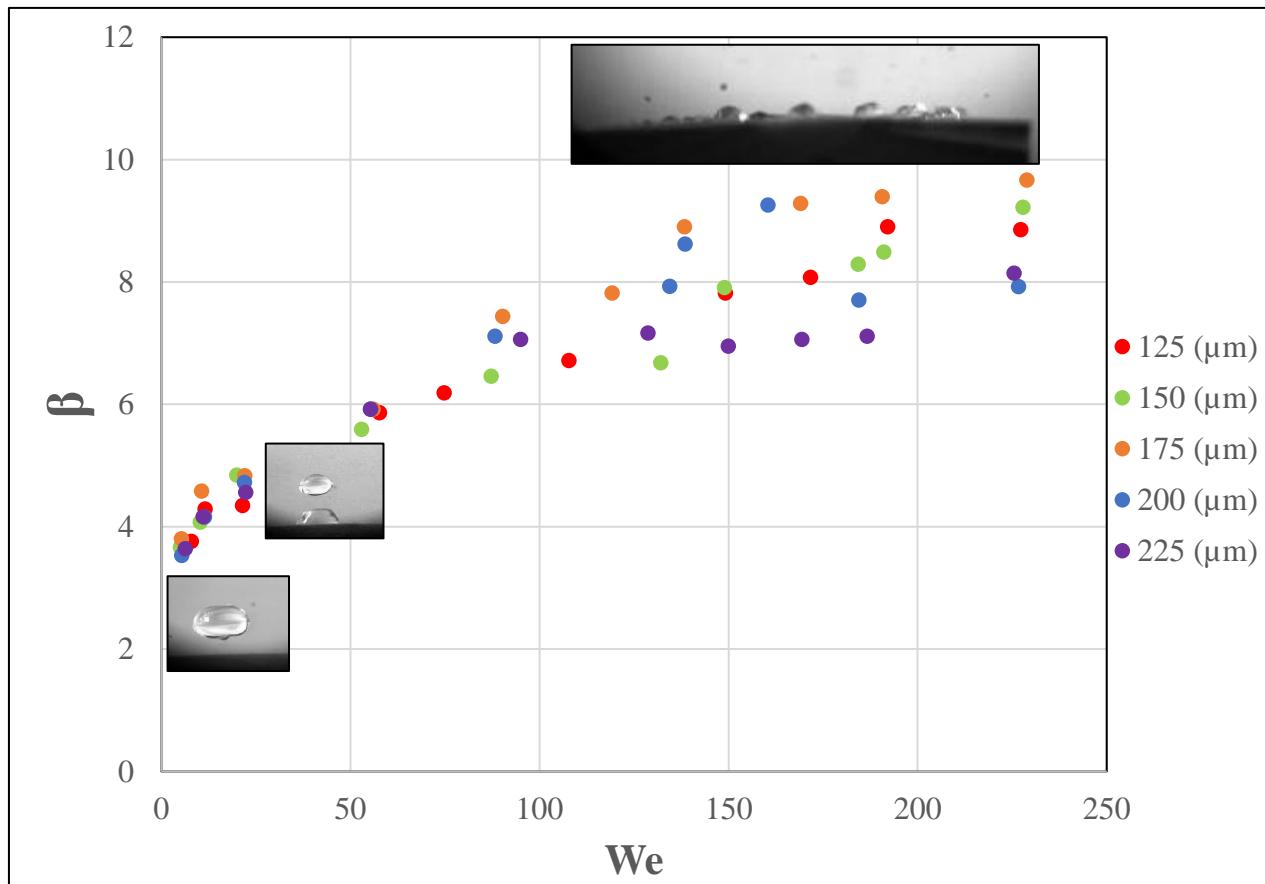


Figure 5. 12: Effet de la topographie de surface sur ( $\beta$ ) pour un volume de gouttelette de 10  $\mu\text{l}$ .

#### 5.4. Prédiction de régime de mouillage basant sur la balance des pressions $P_{wh}$ et $P_L$

En basant sur les équations 2.4 et 2.5 pour calculer la pression de coup de bâlier  $P_{wh}$  et  $P_L$  respectivement, afin de réaliser l'état de Cassie-Baxter sur nos surfaces micro-structurées. À cet égard, il fallait que  $P_{wh} < P_L$ . Cependant,  $P_{wh}$  a été trouvé qu'est toujours supérieur que  $P_L$ . Voici un exemple de calcul pour une micro-structure ayant :  $S = 125 \mu\text{m}$ ,  $d = 75 \mu\text{m}$ ,  $h = 90 \mu\text{m}$ , avec  $v_i = 0,37 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$P_{wh} \approx 120275 \text{ Pa}$$

$$P_L \approx 202 \text{ Pa.}$$

Selon ces calculs  $P_{wh} > P_L$ . Ce qui présente l'état de Wenzel [39]. Cependant, cette micro-structure réalise l'état de Cassie-Baxter vu que  $\text{CA} > 150^\circ$  et  $\text{CAH} < 10^\circ$ , de plus le comportement de gouttelette d'eau est le rebondissement complet. Alors, ces deux équations ne se conforment pas avec les résultats obtenus.

## Conclusion

L'étude du comportement de la gouttelette d'eau sur les surfaces micro-structurées de PDMS a démontré plusieurs scénarios tels que : un rebondissement total, un rebondissement partiel, un jet singulier, une éclaboussure rapide, une récession de rupture ainsi qu'une déposition.

Généralement, la probabilité de l'apparaître des comportements diminuent avec l'augmentation de  $\text{We}$ ,  $\text{Re}$  et  $S$ . Par exemple, la probabilité de l'apparaitre du comportement de rebondissement complet et partiel diminue avec l'augmentation de  $\text{We}$ , de  $\text{Re}$  et de  $S$ , et vice versa avec le comportement de récession de rupture.

En outre, le rebondissement total est présent dans le cas des surfaces superhydrophobes ( $d=75\pm3 \text{ }\mu\text{m}$ ) avec  $\text{We} < 20$ ,  $\text{Re} < 1200$  ainsi que  $\beta < 4$ . En revanche, le rebondissement partiel est présent pour la quasi-totalité des surfaces où  $\text{We} < 2150$  et  $\text{Re} < 4500$ .

La déposition pourrait apparaître dans le cas où  $\text{We} < 70$  dans les micro-structures ayant  $S \geq 225 \text{ }\mu\text{m}$  et  $d= 100 \text{ }\mu\text{m}$ .

## CHAPITRE 6

### CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Une étude expérimentale a été réalisée pour l'observation du comportement de gouttelettes d'eau impactant des surfaces micro-structurées. Ce travail a permis de définir les micro-structures les plus appropriées afin d'obtenir des surfaces hydrophobes et/ou superhydrophobes avec des comportements de rebondissement. De plus, les paramètres des gouttelettes d'eau (taille, vitesse d'impact (nombre du We) etc.) sont étudiés pour décrire l'effet du comportement de celles-ci sur ces surfaces. Lors de la réalisation de ce projet, plusieurs parties ont été traitées. Au départ, une méthode simple et industriellement applicable a été adoptée pour produire ces surfaces (usinage CNC).

En effet, cette étude pourrait ouvrir de nouvelles voies dans la fabrication des surfaces hydrophobes et/ou superhydrophobes à l'échelle industrielle. Il s'avère que la machine CNC était en mesure de respecter les conditions exigées, tels que : l'espacement centre à centre des trous, le diamètre et la hauteur. Le kapton et l'aluminium sont utilisés comme substrat pour créer les micro-trous de 100  $\mu\text{m}$  et 75  $\mu\text{m}$  du diamètre. Pour les substrats du kapton, deux différentes épaisseurs ont été servies (50,9  $\mu\text{m}$  et 120  $\mu\text{m}$ ). Un certain défi a été rencontré pour les trous avec un faible diamètre (75  $\mu\text{m}$ ) car la mèche cassait régulièrement malgré l'utilisation de polystyrène pour absorber le choc, il existe également plus de résidus dans le cas du kapton que l'aluminium. La présence de ces résidus dans le cas du kapton pourrait être justifiée par son élasticité élevée ainsi que sa force électrostatique.

Par la suite, la réplication des micro-structures a été faite par la machine de compression. Le PDMS a été utilisé comme matériel de réplication. Après la réplication il paraît que les structures sont de meilleure qualité dans le cas de l'aluminium que dans celui du kapton. Cette différence de qualité pourrait se justifier, d'une part, par la présence des résidus dans les substrats de kapton qui sont bien attachés sur la surface, d'autre part, par l'effet de l'utilisation de l'agent de démoulage pour les substrats d'aluminium. L'agent de démoulage est un élément incontournable pour l'obtention des micro-structures de qualité.

La caractérisation des micro-structures a par la suite été effectuée par l'intermédiaire du goniomètre pour mesurer l'angle de contact. Deux différents volumes de gouttelette 10 et 20  $\mu\text{l}$  qui correspondent aux diamètres 2,67 et 3,37 mm (pluie faible et pluie moyenne) ont été utilisés. Des surfaces superhydrophobes ont été obtenues pour les micro-structures ayant un diamètre de 75  $\mu\text{m}$ . L'angle de contact de ces surfaces varient entre 151° et 153°, avec l'hystérésis de l'angle de contact

compris entre 6° et 9°.

En outre, les micro-structures ayant  $d=100 \mu\text{m}$  sont des surfaces hydrophobes, où l'angle de contact est moins de 150° (138°-148°) ainsi que l'hystérésis de l'angle de contact est supérieure à 20°

La validation des micro-structures obtenues a été observée par microscopie électronique à balayage. Les figures de MEB obtenues confirment l'effet de l'utilisation de l'agent du démoulage et la présence des résidus sur la qualité de la réplication des micro-structures. De sorte que les meilleures micro-structures sont celles de l'aluminium.

Enfin, six différents comportements de gouttelette d'eau sur les surfaces micro-structurées ont été observés, soient : le rebondissement complet, le rebondissement partiel, la déposition, la récession de rupture, l'éclaboussure rapide et le jet singulier.

Le rebondissement complet s'observe lorsque  $We < 20$  dans le cas des micro-structures régulières de  $d= 75 \mu\text{m}$ ,  $h= 90 \mu\text{m}$  et  $S= 125-150 \mu\text{m}$  pour  $D= 2,26 \text{ mm}$  correspondant à  $V=10 \mu\text{l}$ , et un rebondissement complet au même (d) et (h) avec  $S= 175 \mu\text{m}$  lorsque  $D= 3,37 \text{ mm}$  correspondant à  $V= 20 \mu\text{l}$ .

Il s'avère que le rebondissement partiel est plus dominant dans les micro-structures à base d'aluminium et du kapton épais lorsqu'il avait plus d'air emprisonné entre les piliers et la gouttelette ( $h \geq 90 \mu\text{m}$ ) qui pourrait mener au rebondissement partiel. En se basant sur les résultats expérimentaux, ce comportement qui est le rebondissement partiel se produit seulement si  $We < 250$  pour les micro-structures à base d'aluminium avec un espacement centre à centre du pilier  $S \leq 225 \mu\text{m}$  pour un volume de gouttelette de 10  $\mu\text{l}$ . Cependant, le rebondissement partiel est présent pour les micro-structures avec un  $S \leq 175 \mu\text{m}$ , toujours avec un volume de gouttelette de 10  $\mu\text{l}$ , en raison de la pénétration de la gouttelette entre les piliers de la surface. De plus, les résultats obtenus montrent que les paramètres d'espacement centre à centre du pilier (S) et la hauteur du pilier (h) jouent un rôle indispensable dans le comportement de gouttelette d'eau sur une surface micro-structurée. L'augmentation de la hauteur et l'espacement centre à centre des piliers permettent d'augmenter l'air emprisonné entre les piliers, cependant il n'est pas toujours efficace. La pénétration de la gouttelette entre les piliers pourrait empêcher l'obtention de l'état de Wenzel, car la gouttelette n'avait pas une énergie suffisante pour se rebondir.

Lorsqu'il n'existe plus de poches d'air entre les piliers, en augmentant la hauteur du pilier (Kapton 50,9  $\mu\text{m}$ , Aluminium 80  $\mu\text{m}$  et Kapton 122  $\mu\text{m}$ ), la zone de contact entre la gouttelette et la surface micro-structurée est diminuée. Cette diminution conduit à la diminution de la pénétration de la gouttelette entre les piliers. En revanche, il s'agit plus de dissipation d'énergie avec l'augmentation de l'espacement centre à centre du pilier ( $S = 200\text{-}300 \mu\text{m}$ ) puisqu'il n'y a pas assez de poches d'air pour laisser la gouttelette stocker l'énergie cinétique pour rebondir [10, 46-52].

Tel que décrit dans la littérature [10, 44-46], il est mentionné que la récession de rupture et l'éclaboussure rapide peuvent survenir dans le même nombre de Weber. En analysant les résultats préliminaires, deux phénomènes ne sont pas observables au même nombre de Weber. Cette remarque confirme que le nombre de We est étroitement associé à topographie de la surface ( $d$ ,  $h$  et  $S$ ).

La nature du substrat (polymère ou métal) pourrait aussi affecter le comportement de la gouttelette d'eau. Il paraît que les micro-structures de PDMS à base d'aluminium donneraient la meilleure extension de rebondissement partiel. D'autre part, la taille de gouttelette est un facteur qui affecte le comportement des gouttelettes d'eau sur les surfaces micro-structurées. Lorsque la gouttelette est plus grosse, elle pénètre plus facilement en raison de son poids lourd. Alors, pour avoir une surface qui la fait rebondir, la gouttelette d'eau devrait avoir un volume entre 10 et 20  $\mu\text{l}$  et une micro-structure qui possède ( $S$ )  $\leq 175 \mu\text{m}$ , une hauteur  $80 \mu\text{m} \leq h \leq 140 \mu\text{m}$  et un diamètre de  $75 \mu\text{m}$ . À ce niveau-là, des micro-structures de PDMS à base d'aluminium qui comprennent des espacements centre à centre du pilier : 125, 150, 175, 200 et 275  $\mu\text{m}$ , ont été réalisées.

Ce travail confirme les études précédentes d'Antonini et al., et de Tran et al. [46], portant sur le paramètre d'épandage maximal. Selon nos résultats,  $\beta$  ne doit pas dépasser 4 pour obtenir un rebondissement complet de gouttelette d'eau impactant sur la micro-structure mentionnée ci-dessous. Une meilleure gamme des rebondissements partiels par rapport à la recherche précédente (Jusqu'à ce  $We = 250$ ) a également été obtenue.

En fin de compte, ces résultats obtenus conduisent à une série de recommandations qui pourraient servir pour un futur projet de recherche. L'étude des points suivants est fortement recommandée :

- Étude approfondie sur la topographie des micro-structure et les paramètres intrinsèque ( $D$  et  $v_i$ ) afin d'élargir la plage de rebondissement complet.
- Étude de possibilité de servir les micro-structures développées pour diminuer l'adhésion de glace.

- Proposer l'avenue pour concevoir des revêtements avec le meilleur potentiel de diminuer l'accumulation ou l'adhérence de la glace.
- Étude approfondie pour déterminer des formules utiles des paramètres  $P_{wh}$  et  $P_L$  dans le cas des surfaces micro-structurées, pour avoir un modèle de Cassie-Baxter.
- Proposer une étude avec des gouttelettes plus petites et à grande vitesse.

## Références

- [1] D. Khojasteh, M. Kazerooni, S. Salarian, et R. Kamali, "Droplet impact on superhydrophobic surfaces: A review of recent developments," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 42, pp. 1-14, 2016.
- [2] C. Josserand et S. T. Thoroddsen, "Drop Impact on a Solid Surface," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 48, 2016.
- [3] R. Martin, "Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces," *Fluid Dynamics Research*, vol. 12, no. 2, pp. 61-93, 1993.
- [4] A. L. Yarin, "Drop Impact Dynamics: Splashing, Spreading, Receding, Bouncing," *ANNUAL REVIEW OF FLUID MECHANICS*, vol. 38, pp. 159-192, 2006.
- [5] D. Zine, "Étude numérique et expérimentale de la coalescence des gouttelettes d'eau," *Rapport de stage 2008. Université Pierre Marie Curie*
- [6] K. Maghsoudi, G. Momen, R. Jafari, et M. Farzaneh, "Rigorous testing to assess the self-cleaning properties of an ultra-water-repellent silicone rubber surface," *Surface & Coatings Technology*, vol. 374, pp. 557-568, 2019.
- [7] O. S. A. Rahman, B. Mukherjee, A. Islam, et A. K. Keshri, "Instant Tuning of Superhydrophilic to Robust Superhydrophobic and Self-Cleaning Metallic Coating: Simple, Direct, One-Step, and Scalable Technique," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 11, no. 4, pp. 4616-4624, 2019.
- [8] E. Vazirinasab, R. Jafari, et G. Momen, "Evaluation of atmospheric-pressure plasma parameters to achieve superhydrophobic and self-cleaning HTV silicone rubber surfaces via a single-step, eco-friendly approach," *Surface & Coatings Technology*, vol. 375, pp. 100-111, 2019.
- [9] Y. Wang, J. Xue, Q. Wang, Q. Chen, et J. Ding, "Verification of icephobic/anti-icing properties of a superhydrophobic surface," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 5, no. 8, pp. 3370-81, 2013.
- [10] C. Antonini, F. Villa, I. Bernagozzi, A. Amirfazli, et M. Marengo, "Drop rebound after impact: the role of the receding contact angle," *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, vol. 29, no. 52, pp. 16045-50, 2013.
- [11] Z. Zhang et X. Y. Liu, "Control of ice nucleation: freezing and antifreeze strategies," *Chemical Society reviews*, vol. 47, no. 18, pp. 7116-7139, 2018.
- [12] A. Azimi Yancheshme, G. Momen, et R. Jafari Aminabadi, "Mechanisms of ice formation and propagation on superhydrophobic surfaces: A review," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 279, 2020.

- [13] K. Maghsoudi, E. Vazirinasab, G. Momen, et R. Jafari, "Advances in the Fabrication of Superhydrophobic Polymeric Surfaces by Polymer Molding Processes," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 59, no. 20, pp. 9343-9363, 2020.
- [14] K. Maghsoudi, G. Momen, R. Jafari, et M. Farzaneh, "Direct replication of micro-nanostructures in the fabrication of superhydrophobic silicone rubber surfaces by compression molding," *Applied Surface Science*, vol. 458, pp. 619-628, 2018.
- [15] P. Tsai, S. Pacheco, C. Pirat, L. Lefferts, et D. Lohse, "Drop impact upon micro- and nanostructured superhydrophobic surfaces," *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, vol. 25, no. 20, pp. 12293-8, 2009.
- [16] Z. Guo et F. Yang, *Surfaces and interfaces of biomimetic superhydrophobic materials*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2018.
- [17] Z. Yang, Y. Tian, Y. Zhao, et C. Yang, "Study on the Fabrication of Super-Hydrophobic Surface on Inconel Alloy via Nanosecond Laser Ablation," *Materials* (Basel, Switzerland), vol. 12, no. 2, 2019.
- [18] J. P. Davim et M. J. Jackson, *Nano and micromachining*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2009.
- [19] S. Kim, T. Wang, L. Zhang, and Y. Jiang, "Droplet impacting dynamics on wettable, rough and slippery oil-infuse surfaces," *J. Mech. Sci. Technol.*, 2020, doi: 10.1007/s12206-019-1223-z.
- [20] M. Abolghasemibizaki and R. Mohammadi, "Droplet impact on superhydrophobic surfaces fully decorated with cylindrical macrotextures," *J. Colloid Interface Sci.*, 2018, doi: 10.1016/j.jcis.2017.09.030.
- [21] Jianan Zhao, Xiaoping Li, Ping Cheng, "Lattice Boltzmann simulation of a droplet impact and freezing on cold surfaces" *J. MOE Key Laboratory of Power Machinery and Engineering, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, PR China.*, 2017, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.07.006.
- [22] G. Yang, K. Guo, N. Li, Freezing mechanism of supercooled water droplet impinging on metal surfaces, *Int. J. Refrig.* 34 (2011) 2007–2017.
- [23] S. Jung, M.K. Tiwari, N.V. Doan, D. Poulikakos, Mechanism of supercooled droplet freezing on surfaces, *Nat. Commun.* 3 (2012) 615.
- [24] T. Watanabe, I. Kurabayashi, T. Honda, A. Kanzawa, Deformation and solidification of a droplet on a cold substrate, *Chem. Eng. Sci.* 47 (12) (1992) 3059–3065.
- [25] A. Gębura, K. Janusiak, et M. Poradowski, "An Icing Of Aircraft - Reasons, Consequences, Counteraction," *Journal of KONBiN*, [En ligne].
- [26] M. Farzaneh, *Atmospheric icing of power networks*. [Dordrecht]: Springer, 2008.

- [27] D. K. Sarkar et M. Farzaneh, *Superhydrophobic coatings with reduced ice adhesion*. Utrecht: VNU Science Press, 2009.
- [28] M. Farzaneh, "Ice Accretions on High-Voltage Conductors and Insulators and Related Phenomena," *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 358, no. 1776, pp. 2971-3005, 2000.
- [29] A. Soveja, "Modélisation du processus de texturation par faisceau laser : approches expérimentale et numérique," éd: Université de Bourgogne.
- [30] M. H. Cho et S. Park, "Micro CNC surface texturing on polyoxymethylene (POM) and its tribological performance in lubricated sliding," *Tribology International*, vol. 44, no. 7-8, pp. 859-867, 2011.
- [31] T. Pratap et K. Patra, "Mechanical micro-texturing of Ti-6Al-4V surfaces for improved wettability and bio-tribological performances," *Surface & Coatings Technology*, vol. 349, pp. 71-81, 2018.
- [32] L. Qin, P. Lin, Y. Zhang, G. Dong, et Q. Zeng, "Influence of surface wettability on the tribological properties of laser textured Co-Cr-Mo alloy in aqueous bovine serum albumin solution," *APPLIED SURFACE SCIENCE*, vol. 268, pp. 79-86, 2013.
- [33] B. H. Yan, F. Y. Huang, H. M. Chow, et J. Y. Tsai, "Micro-hole machining of carbide by electric discharge machining," *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 87, no. 1, pp. 139-145, 1999.
- [34] Y.-L. Wan, J. Lou, Z.-J. Yu, X.-Z. Li, et H.-D. Yu, "Single-step fabrication of bionic-superhydrophobic surface using reciprocating-type high-speed wire cut electrical discharge machining," *Chinese Science Bulletin*, vol. 59, no. 28, pp. 3691-3695, 2014.
- [35] P. Roach, N. J. Shirtcliffe, et M. I. Newton, "Progress in superhydrophobic surface development," *Soft Matter*, vol. 4, no. 2, 2008.
- [36] B. Bhushan et Y. C. Jung, "Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction," *Progress in Materials Science*, vol. 56, no. 1, pp. 1-108, 2011.
- [37] T. P. Nguyen, R. Boukherroub, V. Thomy, et Y. Coffinier, "Micro-and nanostructured silicon-based superomniphobic surfaces," *Journal of colloid and interface science*, vol. 416, pp. 280-8, 2014.
- [38] J. W. Stansbury et M. J. Idacavage, "3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities," *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials*, vol. 32, no. 1, pp. 54-64, 2016.
- [39] Z. He et al., "Fabrication of Polydimethylsiloxane films with special surface wettability by 3D printing," *Composites: Part B, Engineering*, vol. 129, 2017.
- [40] X. Li, X. Ma, et Z. Lan, "Dynamic behavior of the water droplet impact on a textured hydrophobic/superhydrophobic surface: the effect of the remaining liquid film arising on the pillars'

tops on the contact time," *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, vol. 26, no. 7, pp. 4831-8, 2010.

[41] K. Lum, D. Chandler, et J. D. Weeks, "Hydrophobicity at Small and Large Length Scales," *JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY B*, vol. 103, no. 22, pp. 4570-4577, 1999.

[42] R. N. Wenzel, "RESISTANCE OF SOLID SURFACES TO WETTING BY WATER," *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 28, no. 8, pp. 988-994, 1936.

[43] S. Zadoorian, "Theoretical study of drop impact on structured surfaces," *McGill University Libraries, [Montreal]*, 2015.

[44] Y. Liu, X. Yan, et Z. Wang, "Droplet dynamics on slippery surfaces: small droplet, big impact," *Biosurface and biotribology*, vol. 5, no. 2, pp. 35-45, 2019.

[45] W. Zhang, R.-r. Zhang, C.-g. Jiang, et C.-w. Wu, "Effect of pillar height on the wettability of micro-textured surface: Volume-of-fluid simulations," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 74, pp. 64-69, 2017.

[46] C. E. Clavijo Angeles, "Droplet impingement on superhydrophobic surfaces," 2017.

[47] Z. Li, Q. Kong, X. Ma, D. Zang, X. Guan, et X. Ren, "Dynamic effects and adhesion of water droplet impact on hydrophobic surfaces: bouncing or sticking," *Nanoscale*, vol. 9, no. 24, pp. 8249-8255, 2017.

[48] J. B. Lee et S. H. Lee, "Dynamic wetting and spreading characteristics of a liquid droplet impinging on hydrophobic textured surfaces," *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, vol. 27, no. 11, pp. 6565-73, 2011.

[49] C. Zhizhao et O. K. Matar, "Impact of Droplets on Liquid Films in the Presence of Surfactant," *Langmuir*, vol. 33, no. 43, 2017.

[50] V. Grishaev, C. S. Iorio, F. Dubois, et A. Amirfazli, "Complex Drop Impact Morphology," éd, 2015.

[51] H. Kim et S. H. Kim, "Nonwettable Hierarchical Structure Effect on Droplet Impact and Spreading Dynamics," *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, vol. 34, no. 19, pp. 5480-5486, 2018.

[52] H. Kim, C. Lee, M. H. Kim, et J. Kim, "Drop impact characteristics and structure effects of hydrophobic surfaces with micro- and/or nanoscaled structures," *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, vol. 28, no. 30, pp. 11250-7, 2012.

[53] J. B. Lee, H. R. Gwon, S. H. Lee, et M. Cho, "Wetting transition characteristics on micro-structured hydrophobic surfaces," *Materials Transactions*, vol. 51, no. 9, pp. 1709-1711, 2010.

[54] T. Deng et al., "Nonwetting of impinging droplets on textured surfaces," *Applied Physics Letters*, vol. 94, no. 13, 2009.

[55] Q. Xu, Z. Li, J. Wang, R. Wang, Characteristics of single droplet impact on cold plate

surfaces, Drying Technol. 30 (15) (2012) 1756–1762.

[56] Y. Pan, K. Shi, X. Duan, et G. F. Naterer, "Experimental investigation of water droplet impact and freezing on micropatterned stainless steel surfaces with varying wettabilities," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 129, pp. 953-964, 2019/02/01/ 2019.

[57] D. Bartolo, F. Bouamrane, V. É, A. Buguin, P. Silberzan, et S. Moulinet, "Bouncing or sticky droplets: Impalement transitions on superhydrophobic micropatterned surfaces," EPL (Europhysics Letters), vol. 74, no. 2, pp. 299-305, 2006.

[58] E. C. e. al, "La mécanique de la pluie," 2007.

[59] M. A. Serio, F. G. Carollo, et V. Ferro, "Raindrop size distribution and terminal velocity for rainfall erosivity studies. A review," Journal of Hydrology, pp. 210-228, 2019.

## Annexe

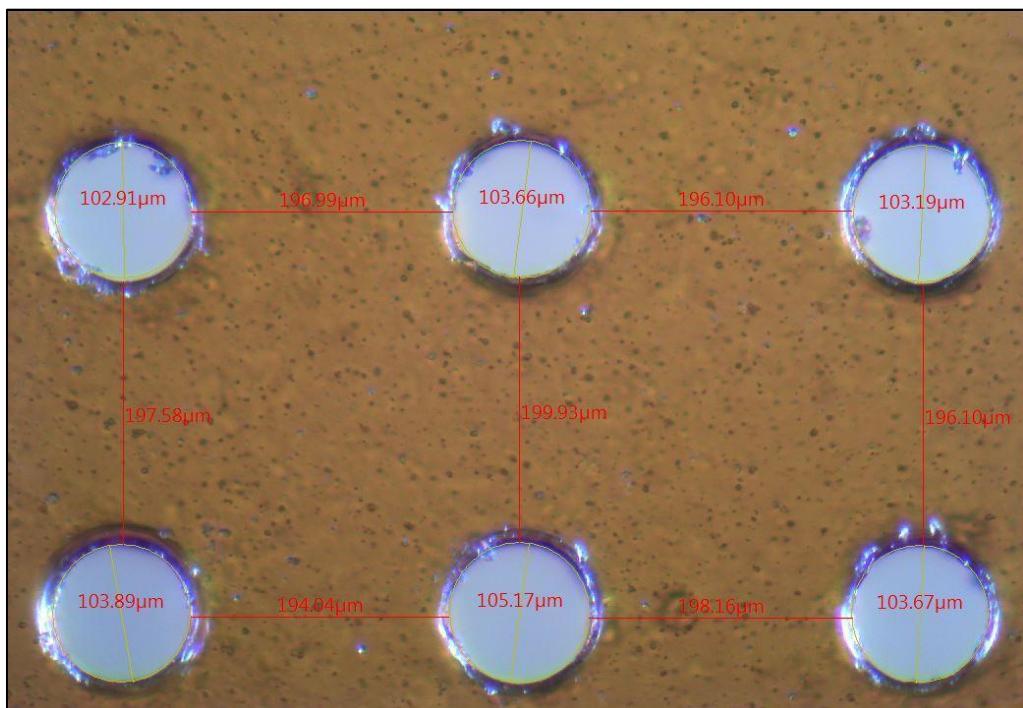
### A.III.1 : Conditions d'enregistrement des vidéos

L'enregistrement des vidéos est obtenu lorsque :

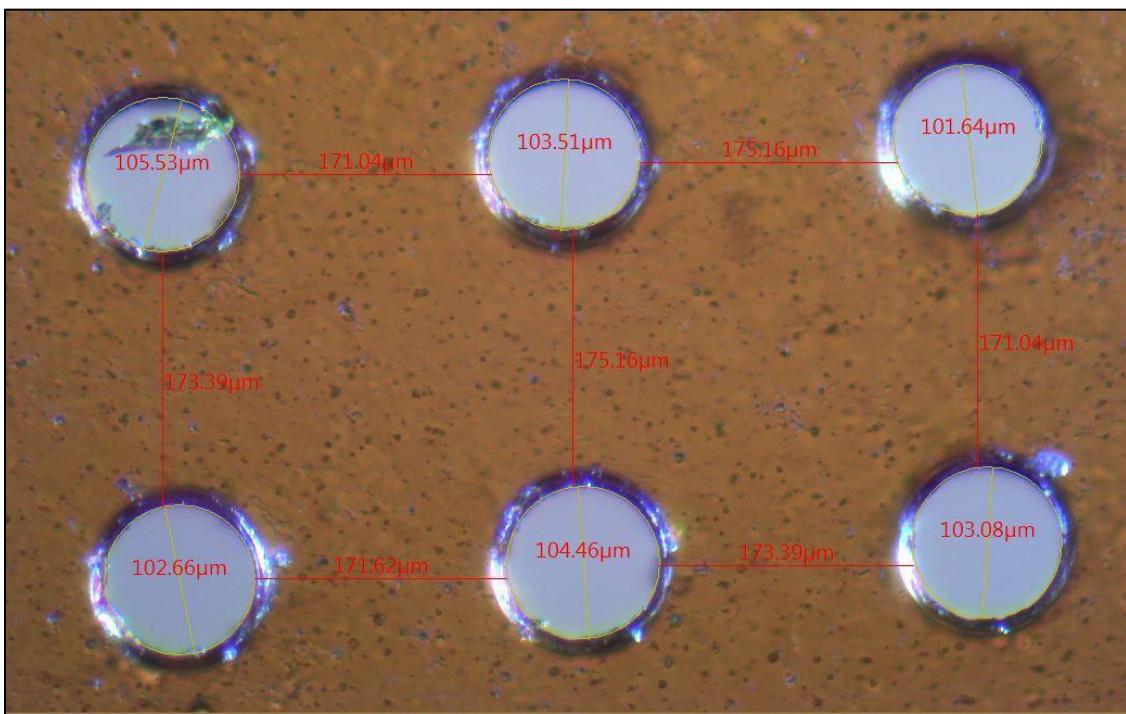
- Le mode d'enregistrement : milieu permet d'enregistrer une vidéo 50% avant et après l'avoir démarré
- Fréquence d'image est de 5400 fps
- Vitesse d'optique est de 1 frame/seconde
- Résolution : 1024X752.

### Annexe A. IV. 1 Images de microscope optiques des micro-trous ayant un $d = 100 \mu\text{m}$

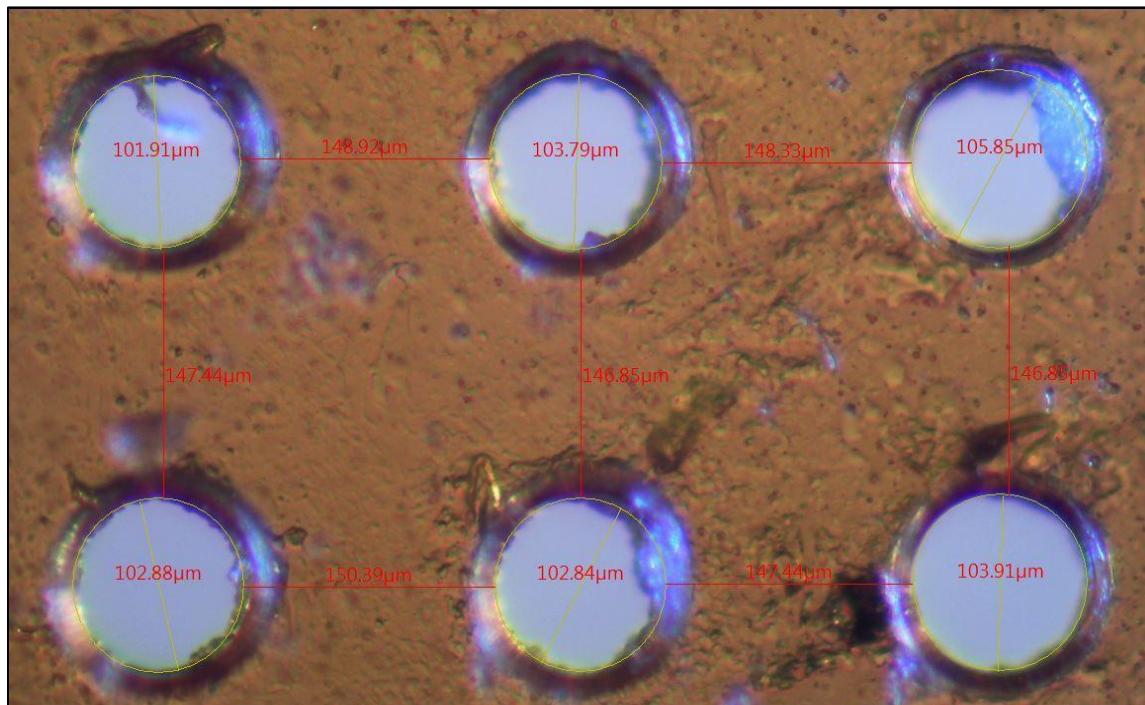
#### Kapton 50,9 $\mu\text{m}$



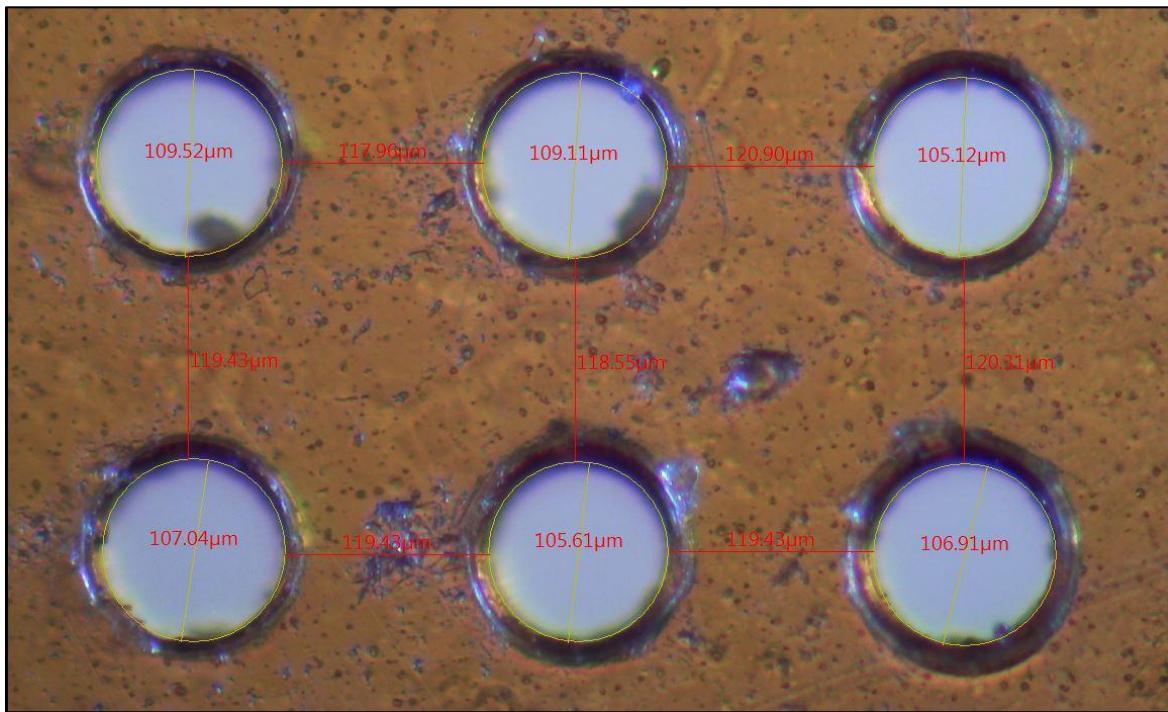
A.III. 1: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 50,9  $\mu\text{m}$  avec un  $S = 300 \pm 2 \mu\text{m}$ .



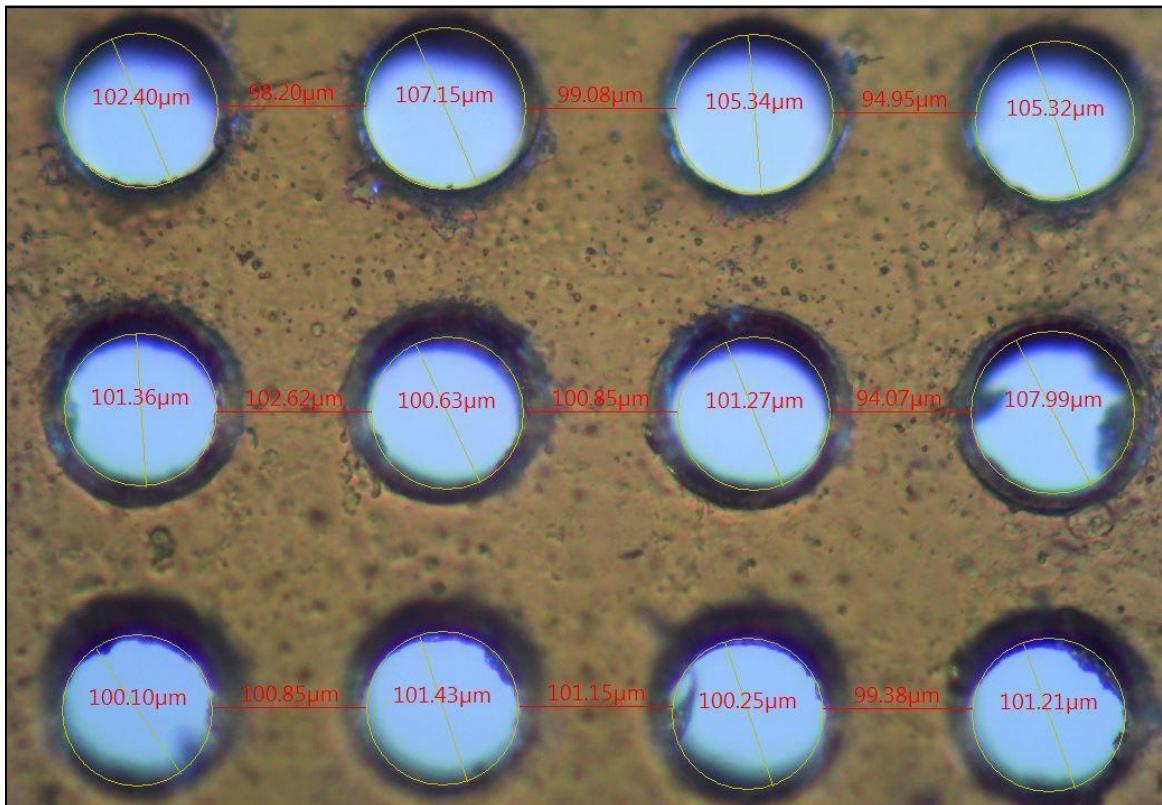
A.III. 2: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 50,9  $\mu\text{m}$  avec un  $S=275\pm3 \mu\text{m}$ .



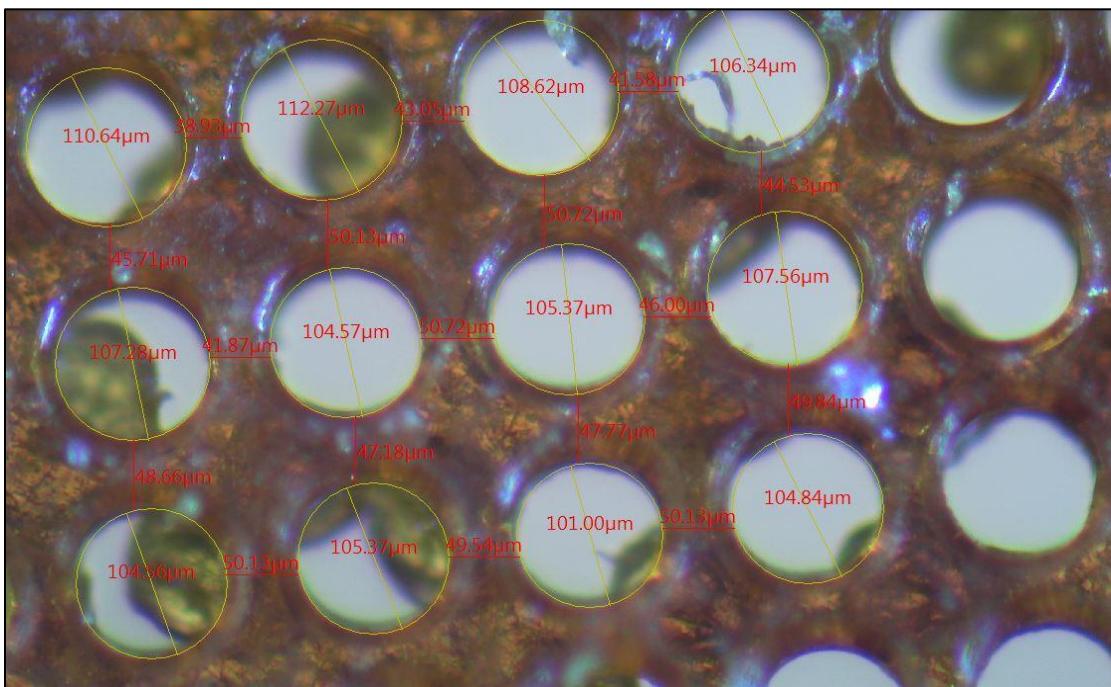
A.III. 3: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 50,9  $\mu\text{m}$  avec un  $S=250\pm3 \mu\text{m}$ .



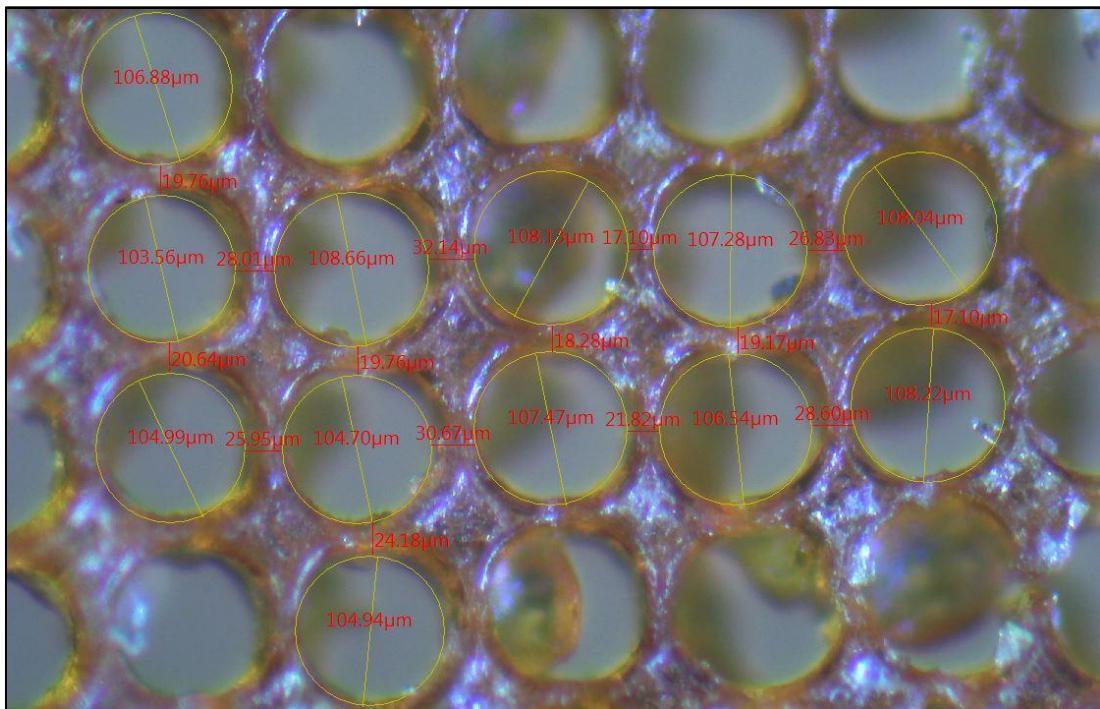
A.III. 4: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 50,9  $\mu\text{m}$  avec un  $S= 225\pm 2 \mu\text{m}$ .



A.III. 5: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 50,9  $\mu\text{m}$  avec un  $S= 200\pm 4 \mu\text{m}$ .

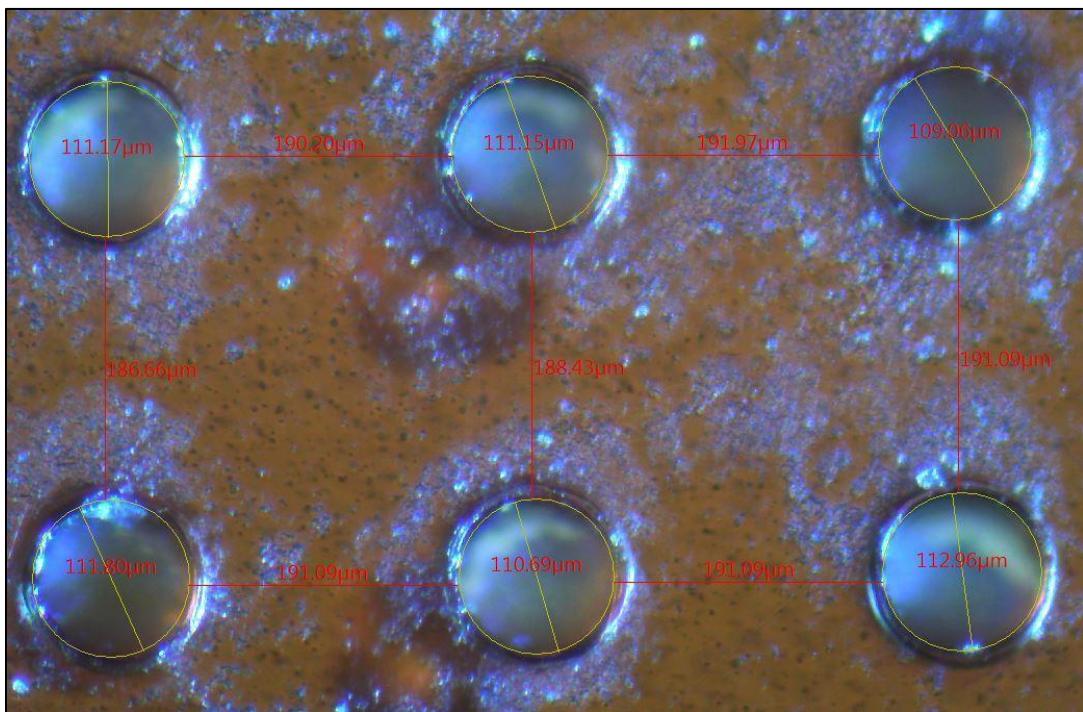


A.III. 6: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 50,9 µm avec un  $S= 150\pm 4$  µm.

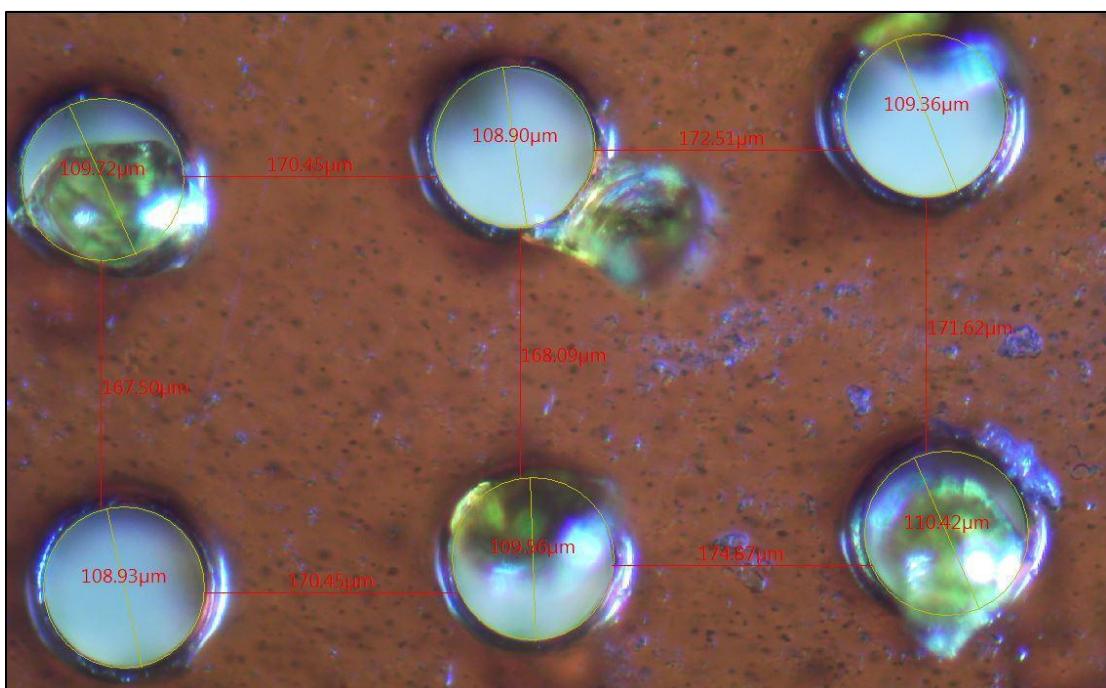


A.III. 7: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 50,9 µm avec un  $S= 125\pm 3$  µm.

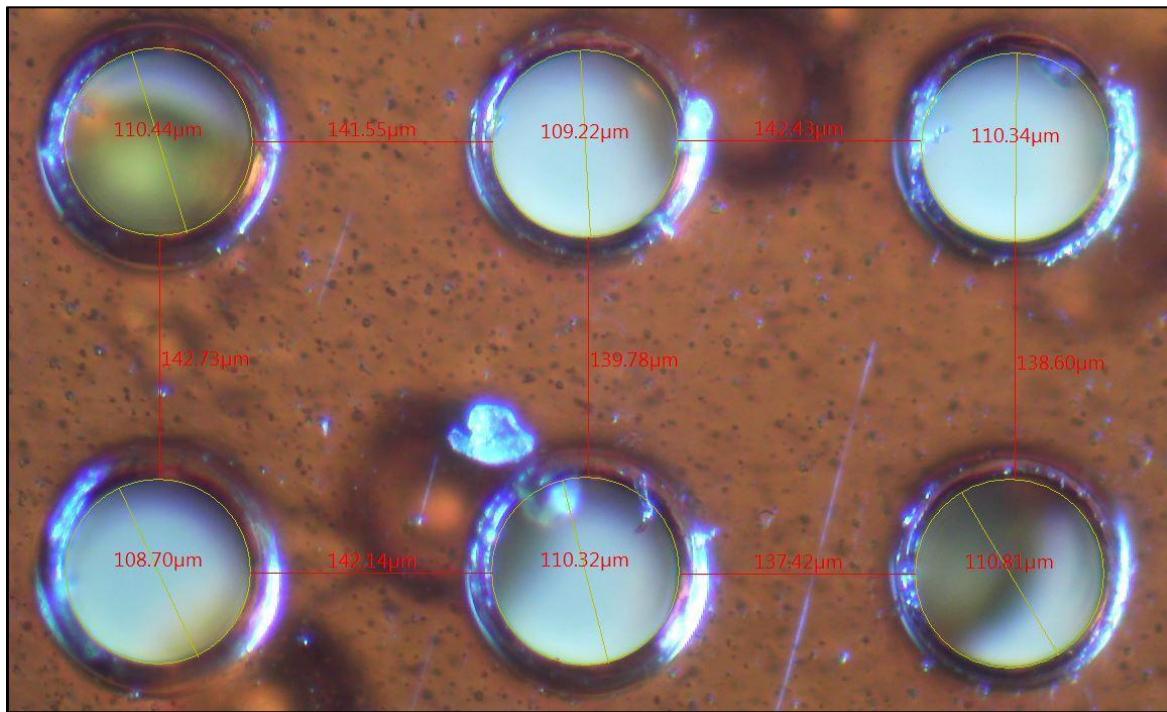
### Kapton 122 $\mu$ m



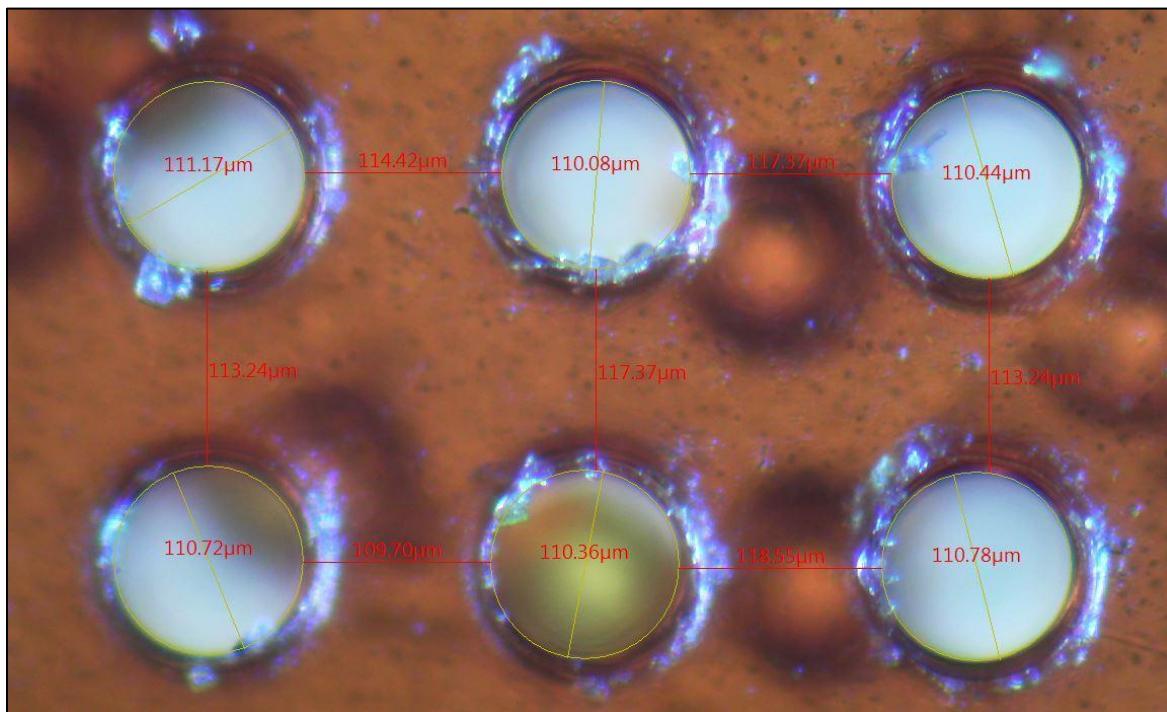
A.III. 8: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 122  $\mu$ m avec un  $S= 300\pm 1 \mu$ m.



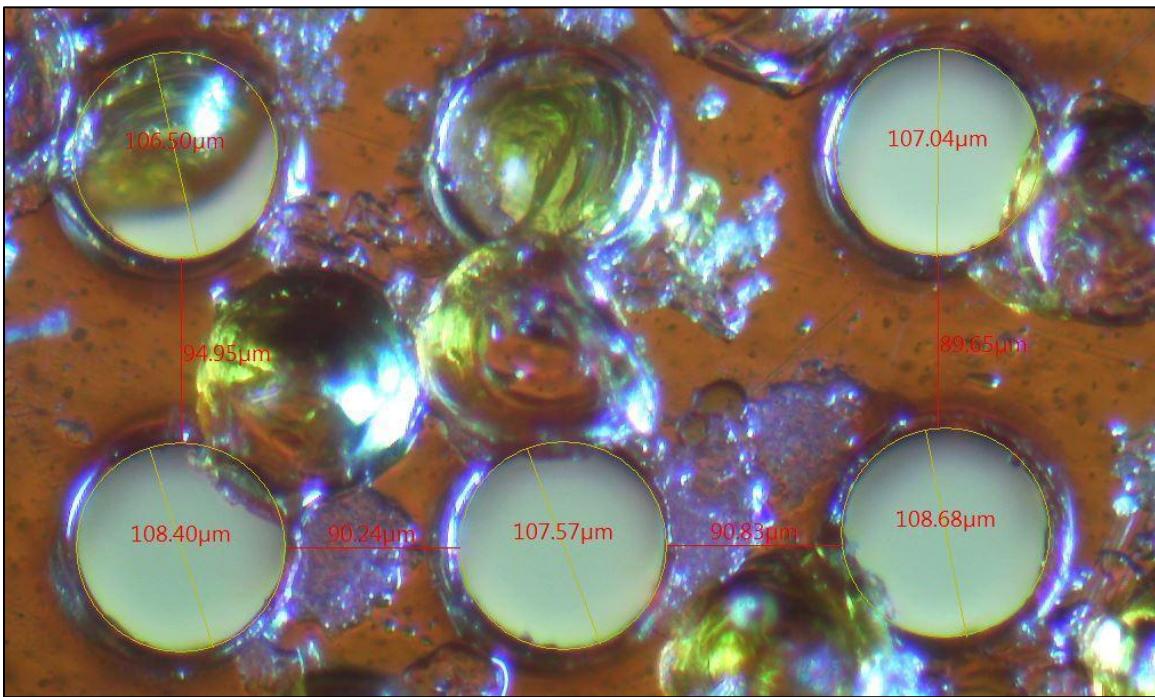
A.III. 9: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 122  $\mu$ m avec un  $S= 275\pm 5 \mu$ m.



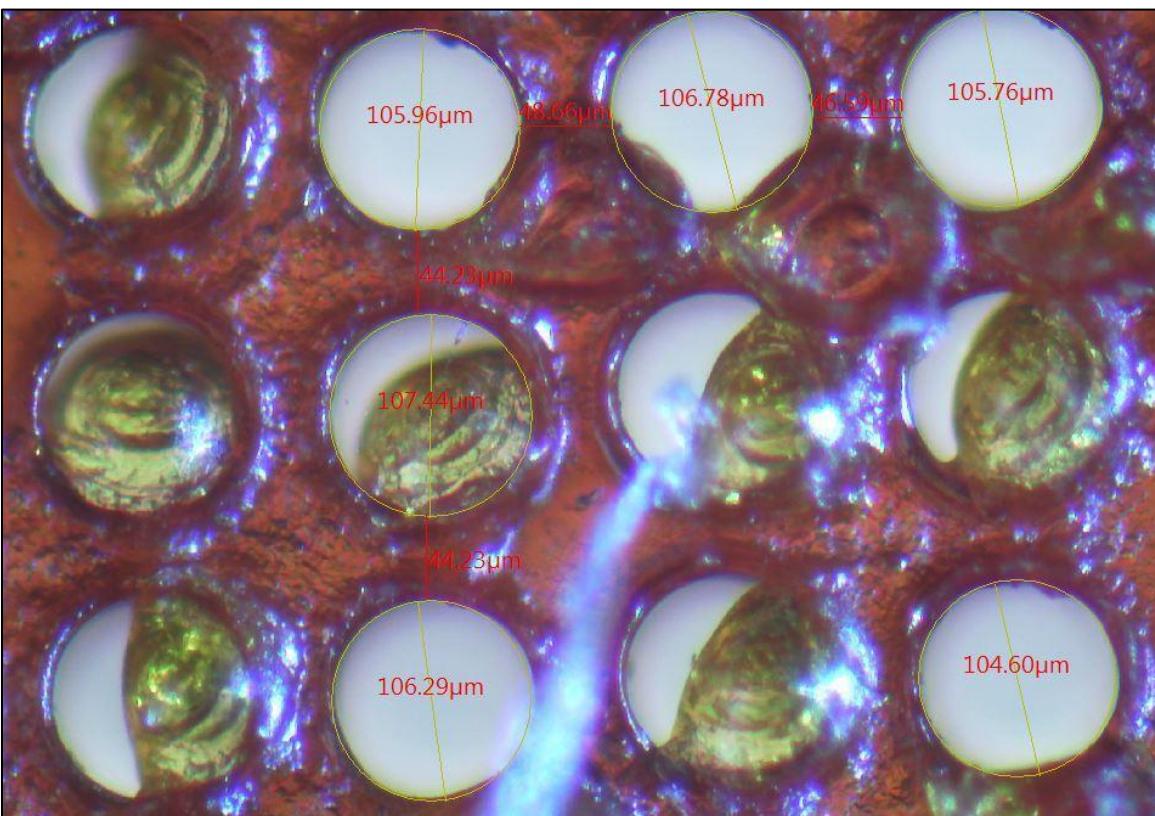
A.III. 10: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 122  $\mu\text{m}$  avec un  $S= 250\pm3 \mu\text{m}$ .



A.III. 11: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 122  $\mu\text{m}$  avec un  $S= 225\pm2 \mu\text{m}$ .

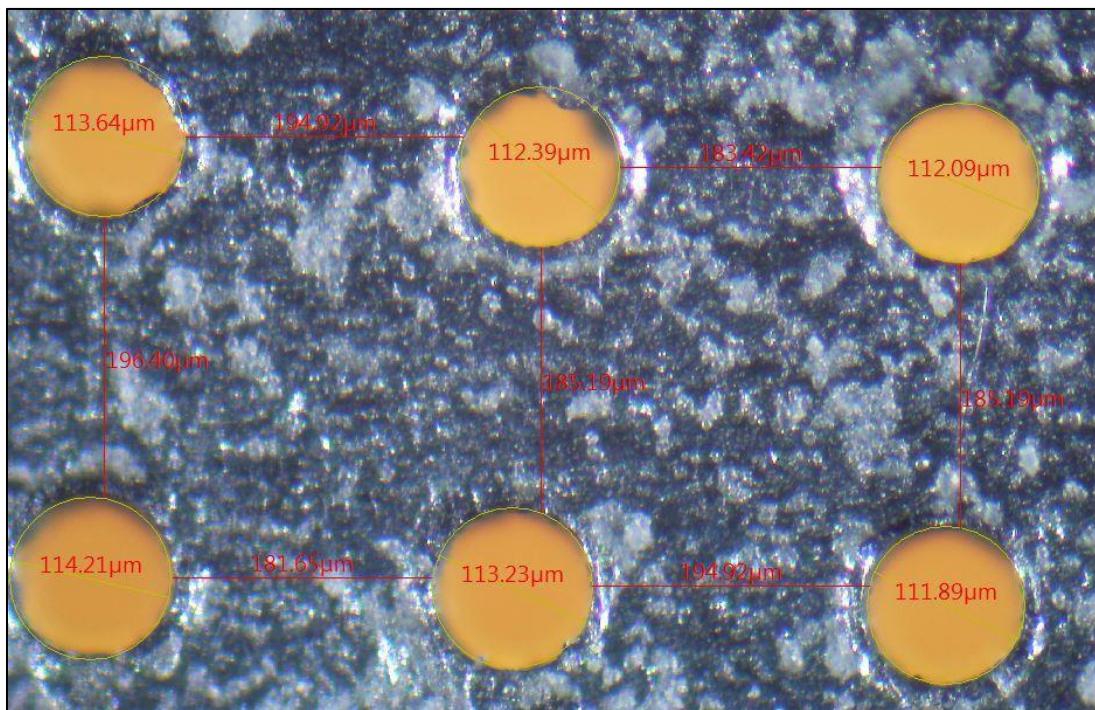


A.III. 12: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 122  $\mu\text{m}$  avec un  $S= 200\pm2 \mu\text{m}$ .

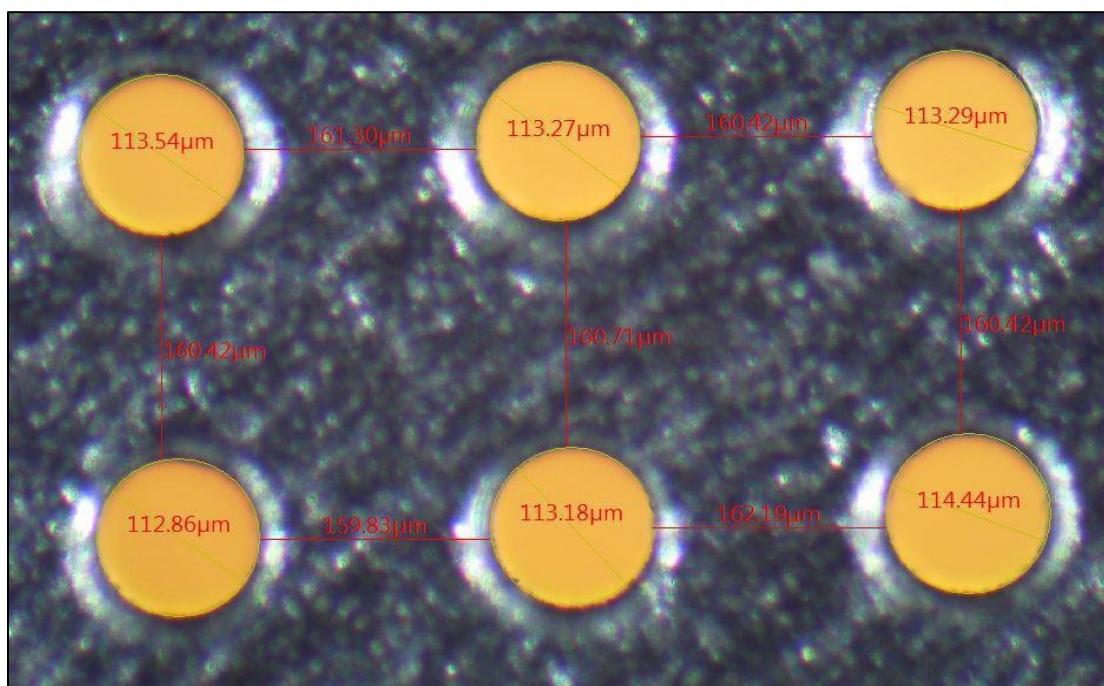


A.III. 13: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Kapton avec l'épaisseur de 122  $\mu\text{m}$  avec un  $S= 150\pm4 \mu\text{m}$ .

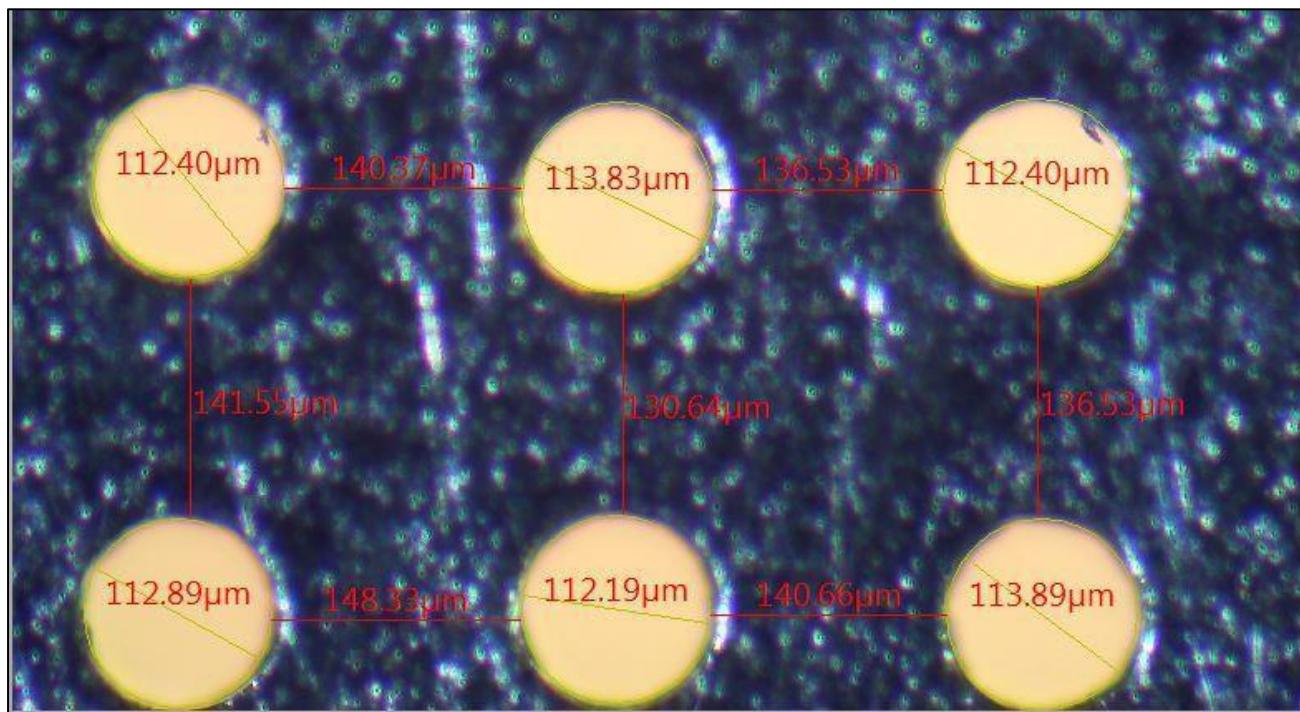
## Aluminium 80 $\mu\text{m}$



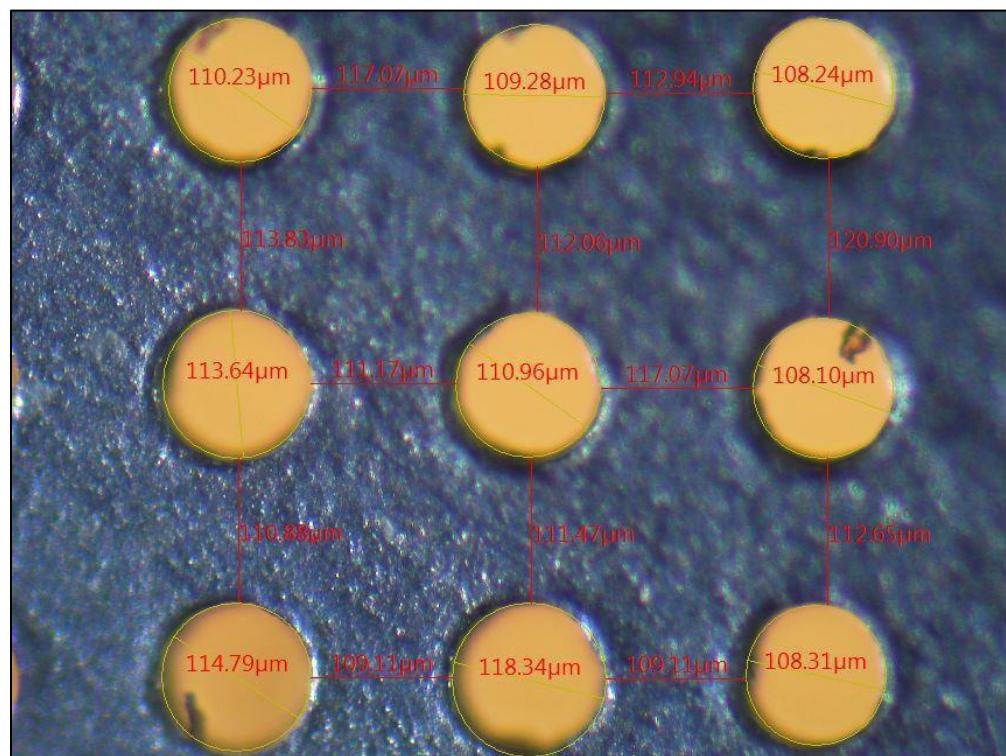
A.III. 14: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Aluminium avec l'épaisseur de 80  $\mu\text{m}$  avec un  $S= 305\pm 3 \mu\text{m}$ .



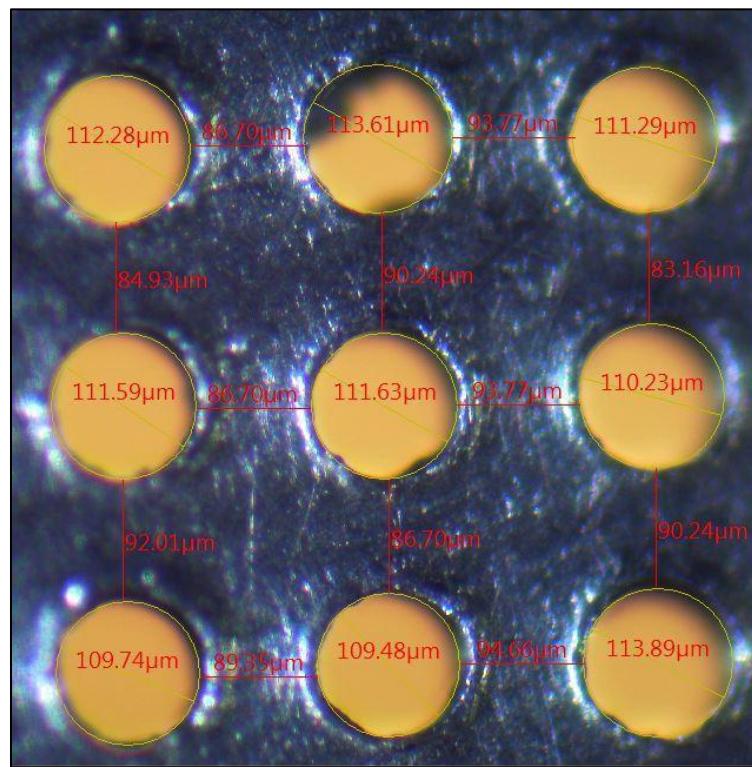
A.III. 15: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Aluminium avec l'épaisseur de 80  $\mu\text{m}$  avec un  $S= 275\pm 4 \mu\text{m}$ .



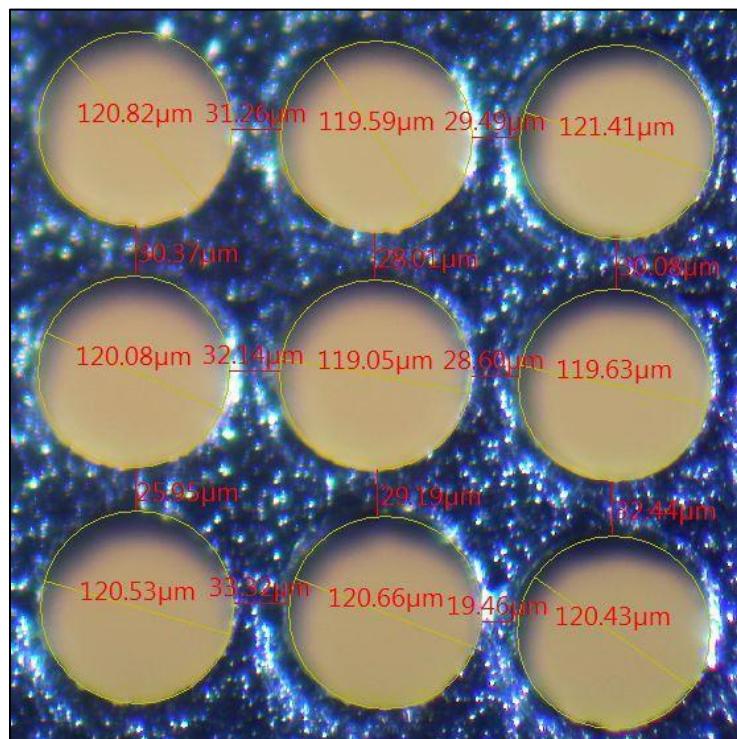
A.III. 16: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Aluminium avec l'épaisseur de 80 µm avec un  $S= 250\pm 3$  µm.



A.III. 17: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Aluminium avec l'épaisseur de 80 µm avec un  $S= 225\pm 2$  µm.



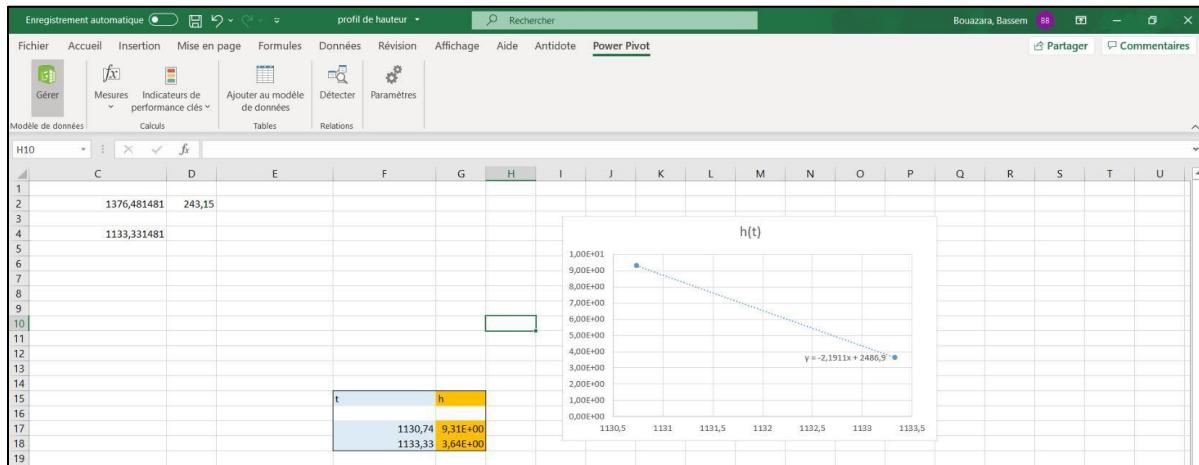
A.III. 18: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Aluminium avec l'épaisseur de 80  $\mu\text{m}$  avec un  $S= 200\pm 5 \mu\text{m}$ .



A.III. 19: Image microscope optique (agrandissement 100X) d'arrangement des trous réalisés sur Aluminium avec l'épaisseur de 80  $\mu\text{m}$  avec un  $S= 150\pm 3 \mu\text{m}$ .

## Annexe V.1 Courbes $h=f(t)$

La figure V.1.1 présente le profil de la hauteur en fonction du temps afin de calculer la vitesse d'impact de la gouttelette heurte sur une surface.



V.1. 1. Profil de la vitesse d'impact de la gouttelette d'eau impactant sur une surface.