

Influence de la silice sur le comportement des matériaux

3.3.1 La silice dans le PVA

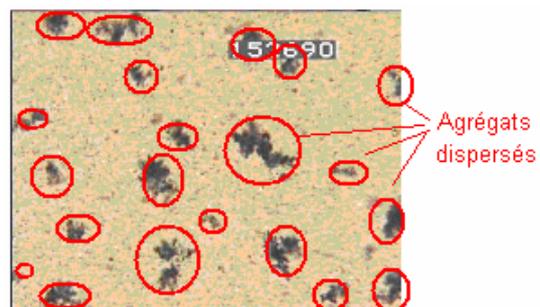
La silice dans le PVA est présente à un taux inférieur à 1%. Sachant que les charges de silices modifient la rhéologie d'une formulation, nous avons cherché à déterminer l'influence de cette charge sur le comportement du PVA sous cisaillement. Le CEMEF dispose d'un rhéomètre optique contra-rotatif qui nous a permis de suivre par microscopie optique le comportement des agrégats de silice contenu dans notre solution sous un cisaillement de taux croissant. L'ensemble des photographies est montré sur la *Figure 3-10* et le lien entre ces observations et les résultats en viscosimétrie est donné *Figure 3-11*.

A faible taux de cisaillement, nous avons observé précédemment que les courbes d'écoulement n'étaient pas linéaires et qu'à mesure qu'augmentait la température, cette zone de non-linéarité augmentait. L'état microscopique durant cette phase n'est pas observable au rhéomètre optique car lors de la mise en position des plateaux, la force exercée par ces derniers conduit à une contrainte supérieure à la contrainte critique ce qui détruit l'état dans lequel se trouve la solution au repos. Nous supposons que l'état dans lequel se trouve la silice durant cette étape est sous forme d'un réseau d'agrégats. Cette hypothèse sera confirmée par la suite car nous avons observé la reconstruction du réseau au repos.

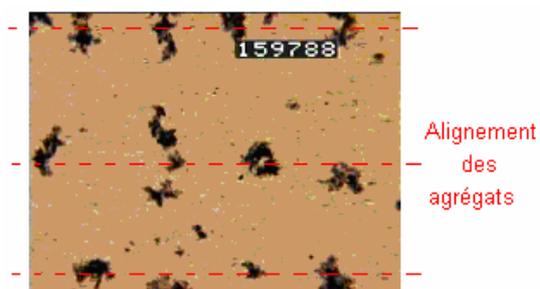
Lorsque la contrainte critique est atteinte, la viscosité du PVA devient indépendante du taux de cisaillement. En fait, les observations (*Figure 3-10-A*) montre qu'au plateau newtonien, la silice se trouve sous forme d'agrégats dispersés de taille variable. A mesure qu'augmente le cisaillement, on constate l'arrachement de petits amas de silice à partir des plus gros : la solution est alors plus finement dispersée.

A fort taux de cisaillement (10 s^{-1}), le comportement newtonien s'arrête et on retrouve des courbes non-linéaires avec une pente négative. On observe alors que les agrégats et les particules de silice se sont alignés dans le sens de l'écoulement (*Figure 3-10-B*).

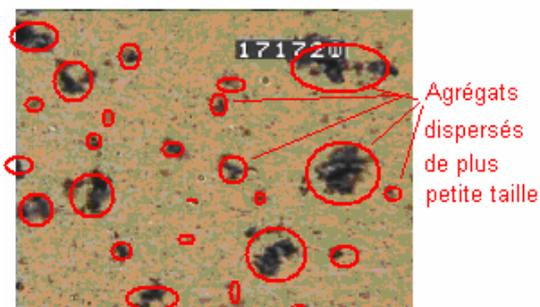
A 500 s^{-1} , la solution de PVA est constituée de petits agrégats de silice bien dispersés (*Figure 3-10-C*). Si on observe l'échantillon au repos pendant quelques minutes, on constate que ces agrégats ont tendance à se rapprocher (*Figure 3-10-D*) pour reformer ainsi petit à petit de plus gros agrégats.



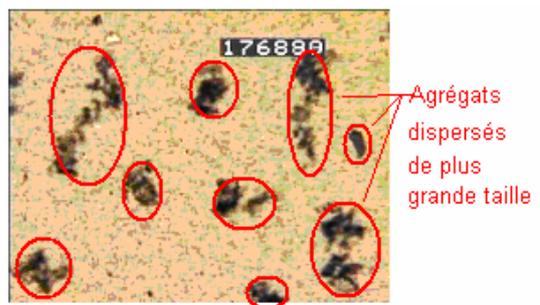
A/ Cisaillement nul



B/ Cisaillement = 10 s^{-1}



C/ Cisaillement nul tout de suite après fort cisaillement



D/ Cisaillement nul après fort cisaillement

Figure 3-10 : Observation du comportement de la silice sous rhéo-optique

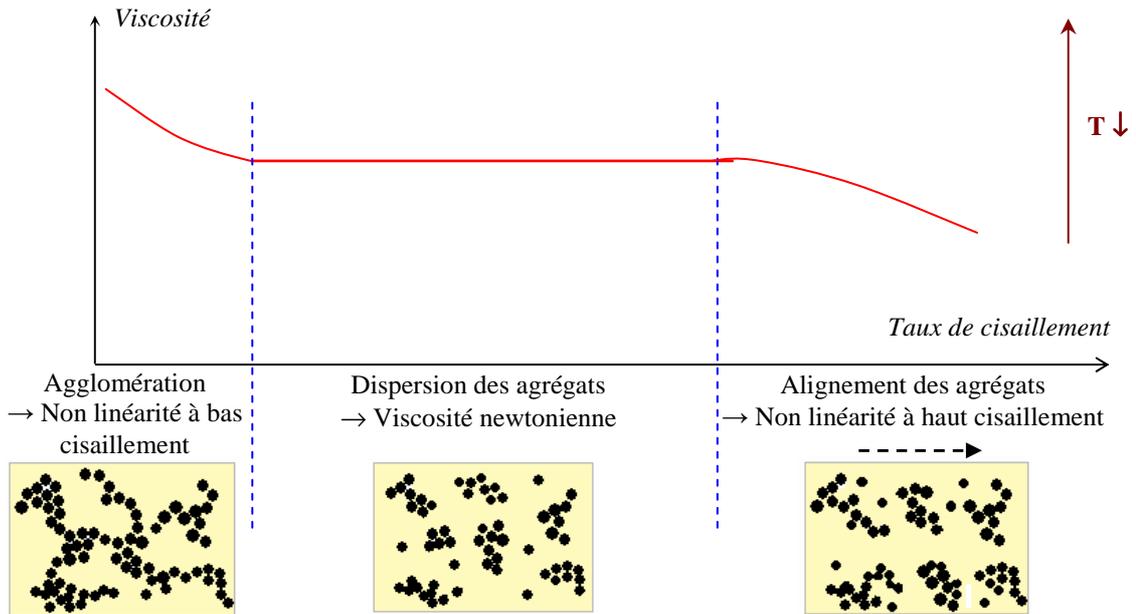


Figure 3-11 : Schéma du lien entre les courbes d'écoulement et le comportement de la silice observé

Pour confirmer que l'arrangement des charges de silice est bien à l'origine du comportement à seuil du PVA, une solution sans silice a été testée en viscosimétrie dans les mêmes conditions. La Figure 3-12 présente les résultats obtenus à différentes températures. La viscosité observée est proche de celle de l'eau, ce qui correspond à la limite inférieure de mesure pour le rhéomètre employé. Ceci explique pourquoi nous n'avons obtenu des résultats cohérents que pour une petite plage de taux de cisaillement (entre 1 et 100 s^{-1}). Cependant, nous pouvons considérer le comportement de la solution de PVA sans silice comme newtonienne et donc qu'elle ne présente pas le même type de comportement à seuil que celle avec silice.

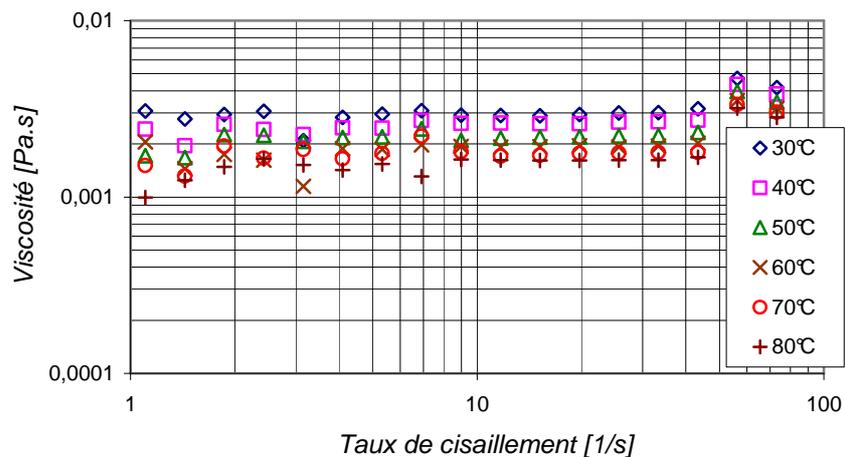


Figure 3-12 : Viscosité en fonction du taux de cisaillement pour une solution de PVA sans silice

La manière avec laquelle s'organisent les amas de silice dans le PVA a une grande influence sur le comportement du PVA sous cisaillement. Ceci n'est vraiment sensible qu'à

bas (réseau d'agrégats) et très haut (alignement d'agrégats) taux de cisaillement, ce qui n'est pas pertinent pour notre modélisation, qui ne considèrera que la zone newtonienne.

3.3.2 La silice dans les silicones

Les silicones présentent un très faible pourcentage de silice sous forme d'agrégats dispersés très irrégulièrement comme le montre la *Figure 3-13*. Leurs diamètres sont de tailles variables : de 1 à 7 μm .

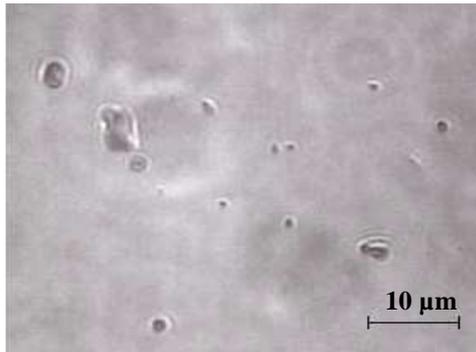


Figure 3-13 : Photographie des agglomérats de silices dans le S1
Photographie réalisée au microscope optique METALLUX 3 (LEITZ) à température ambiante

Comme le pourcentage en silice est très faible, sa structuration ne joue pas un rôle majeur sur le comportement des silicones sous cisaillement. Cependant, un point a dû être vérifié dans le procédé industriel de trempage : lors du trempage, les suspensions de silicones sont entreposées dans de grandes cuves sans agitation pendant plusieurs heures. Il fallait donc être sûr que les amas de silice ne sédimentent pas et que donc les implants obtenus au début et à la fin de la journée ont la même composition. Pour cela il a été calculé la vitesse de sédimentation à l'aide de la formule suivante [Cabane] :

$$u_s = \frac{2}{9} \cdot \frac{1}{\mu_{\text{fluide}}} \cdot \left((\rho_{\text{fluide}} - \rho_{\text{solide}}) \cdot g \cdot d_a^2 \right) \quad \text{Eq. 3-4}$$

où ρ est la masse volumique, μ_{fluide} la viscosité du fluide, g l'accélération et d_a le diamètre des agglomérats considérés comme sphériques.

Dans le cas d'une particule de diamètre de 7 μm , la vitesse de sédimentation est de $u_s^{d=7\mu\text{m}} = 0,16 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Cette vitesse étant très faible, la sédimentation est donc négligeable.

Pour confirmer le résultat de ce calcul, il a été mesuré la différence d'extrait sec et de viscosité entre la surface et le fond de la cuve. La moyenne de l'extrait sec en surface est de 37,55% alors qu'au fond de la cuve elle est de 37,63% soit une différence de 0,08% ; la moyenne de viscosité en surface est de 1,32 Pa.s alors qu'au fond de la cuve elle est de 1,33 Pa.s soit une différence de 0,01 Pa.s. Dans les deux cas, la différence peut être considérée comme insignifiante ce qui confirme qu'il n'y a pas de sédimentation des agrégats de silice.

3.4 Mesure des tensions de surface

3.4.1 Méthodes et matériel

Lors du trempage, deux paramètres physiques clés sont à prendre en compte en plus de la viscosité : la tension de surface entre le liquide et l'air et le type de contact entre le moule et le liquide. Ce paragraphe a pour but de déterminer ces deux facteurs. Les mesures ont été faites à l'aide d'un tensiomètre *DSA1100 Krüss*.

3.4.1.1 *Méthode de la goutte pendante*

Pour calculer la tension de surface entre un liquide et l'air, nous avons choisi d'employer la méthode de la goutte pendante. Cette méthode se base sur l'équilibre entre les forces de gravité et les forces interfaciales. Les gouttes sont formées à l'extrémité d'un capillaire (aiguille) à l'air ambiant. La différence de pression entre deux milieux, dont la surface de séparation est incurvée, est décrite par la loi de Laplace :

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \sigma \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{Eq. 3-5}$$

où P_1 est la pression du côté convexe, P_2 celle du côté concave, σ la tension de surface, R_1 et R_2 les deux rayons de courbure principaux de la surface au point considéré. Dans le cas sphérique, ces deux rayons : $R_1 = R_2 = R$. La *Figure 3-14* présente un schéma de la goutte pendante.

Quand une goutte pendante atteint l'équilibre hydrodynamique et mécanique, gouverné uniquement par la force gravitationnelle et la tension superficielle, la différence de pression à l'interface peut s'exprimer linéairement en fonction de la hauteur de la goutte :

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta \rho g z \quad \text{Eq. 3-6}$$

où ΔP_0 est la différence de pression en un plan sélectionné, $\Delta \rho$ la différence de masse volumique entre les deux fluides et z la hauteur depuis le plan sélectionné.

La combinaison des équations 3-5 et 3-6 permet d'écrire l'équation 3-7.

$$\sigma \cdot \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{2\sigma}{R_0} + \Delta \rho g z \quad \text{Eq. 3-7}$$

où R_0 est le rayon de courbure au sommet de la goutte où $R_0 = R_1 = R_2$. Les rayons de courbure peuvent être calculés à l'aide ces considérations géométriques :

$$R_1 = \frac{\left\{ 1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 \right\}^{3/2}}{\frac{d^2 z}{dx^2}} \quad \text{Eq. 3-8}$$

$$\sin \Phi = \frac{\frac{dz}{dx}}{\left\{ 1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 \right\}^{1/2}} \quad \text{Eq. 3-9}$$

$$R_2 = \frac{x}{\sin \Phi} \quad \text{Eq. 3-10}$$

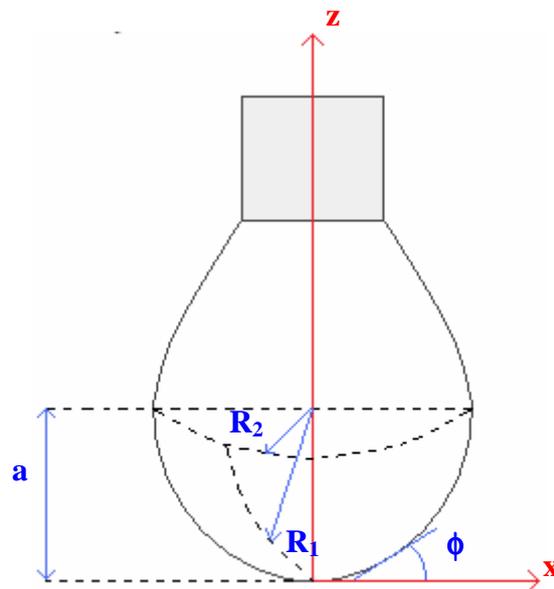


Figure 3-14 : Schéma et géométrie d'une goutte pendante

A partir de là, il est possible de réécrire l'équation de Young-Laplace pour une goutte pendante axisymétrique à l'aide d'un système de trois équations différentielles du premier ordre :

$$\begin{cases} \frac{dx}{ds} = \cos \Phi \\ \frac{dz}{ds} = \sin \Phi \\ \frac{d\Phi}{ds} = \frac{2}{R_0} + \left(\frac{\Delta \rho g}{\sigma} \right) z - \frac{\sin \Phi}{x} \end{cases} \quad \text{Eq. 3-11}$$

Ces équations différentielles sont fonction de s , longueur de l'arc mesurée le long du profil de la goutte. A cela vient s'ajouter des conditions aux limites :

$$x(0) = z(0) = \Phi(0) = 0 \quad \text{Eq. 3-12}$$

Le système différentiel peut être réécrit ainsi :

$$\left\{ \begin{array}{l} \chi(1) = \frac{d\bar{x}}{ds} = \cos \Phi \\ \chi(2) = \frac{d\bar{z}}{ds} = \sin \Phi \\ \chi(3) = \frac{d\bar{\Phi}}{ds} = \beta \bar{z} = \frac{\sin \Phi}{\bar{x}} \end{array} \right. \quad \text{Eq. 3-13}$$

où \bar{x} , \bar{z} et \bar{s} sont des variables adimensionnelles représentant respectivement x , z et s divisées par R_0 . Le paramètre Y est la fonction de forme de la goutte (nombre de Bond), il est négatif pour une goutte pendante, positif pour une goutte posée et nul pour une sphère parfaite. Il est obtenu à partir de l'expression suivante :

$$Y = \frac{2 + \Delta\rho g R_0^2}{\sigma} \quad \text{Eq. 3-14}$$

Comme aucune solution analytique n'est possible, on peut déterminer les valeurs de β et R_0 à partir d'une méthode itérative basée sur des données expérimentales. Dans un premier temps on écrit l'entité φ dépendante des dimensions de la goutte :

$$\varphi = \frac{d_s}{d_e} \quad \text{Eq. 3-15}$$

où d_s et d_e sont des diamètres caractéristiques d'une goutte pendante décrits *Figure 3-15*. Dans un deuxième temps un autre facteur est introduit, le rapport d'homothétie H_o défini par :

$$H_o = -\varphi \left(\frac{d_e}{R_0} \right)^2 \quad \text{Eq. 3-16}$$

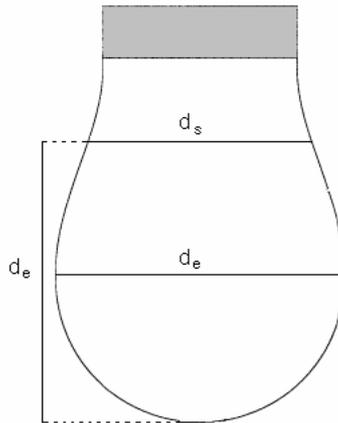


Figure 3-15 : Profil et dimensions d'une goutte pendante

L'expression donnant la tension de surface entre un liquide et l'air est défini par l'expression suivante :

$$\sigma_{\text{liquide/air}} = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_e^2}{H_o} \quad \text{Eq. 3-17}$$

Les tensions superficielles des liquides sont d'ordinaire égales à plusieurs dizaines de mJ/m².

3.4.1.2 Méthode de la goutte posée

Pour déterminer le type de contact entre le moule et le liquide, nous avons utilisé le principe de la goutte posée. Cette méthode permet de déterminer l'aptitude appelée mouillabilité, que possède un liquide à occuper la plus grande surface possible lorsqu'on le dispose sur une surface solide.

Le principe de la mesure consiste à photographier une goutte posée sur une surface non mouillée. La forme de la goutte est déterminée par l'équilibre entre les forces gravitationnelles et les forces capillaires : elle dépend donc de la tension de surface σ , des dimensions de la goutte et de la masse spécifique du liquide ρ . L'angle θ formé (*Figure 3-16*) sera d'autant plus petit que le liquide se répand. La valeur de l'angle de contact θ détermine la capacité de mouillabilité d'un liquide et on distingue quatre cas :

- Il est dit qu'un liquide est parfaitement mouillant quand $\theta = 0^\circ$
- Le liquide est dit mouillant quand $0^\circ < \theta < 90^\circ$
- Le liquide est non mouillant quand $90^\circ < \theta < 180^\circ$
- Le liquide est parfaitement non mouillant quand $\theta = 180^\circ$

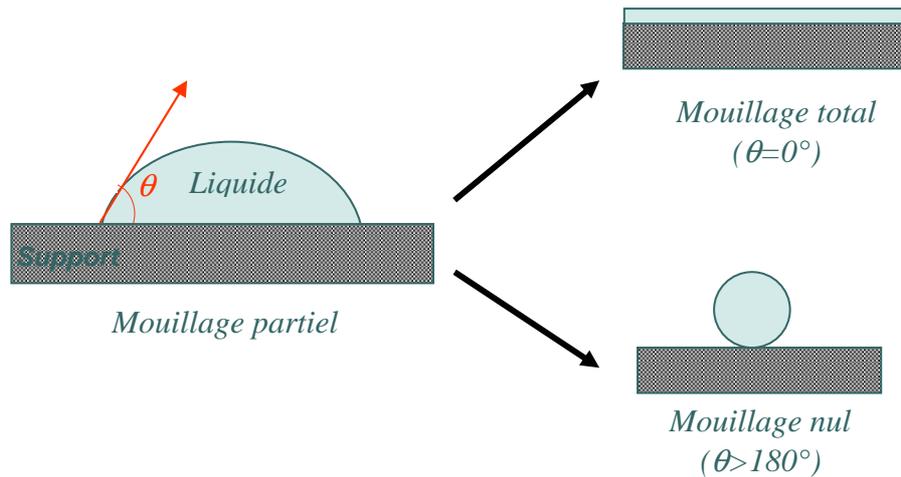


Figure 3-16 : Représentation schématique d'une goutte de liquide posée sur un substrat solide. Le mouillage est caractérisé par un angle de contact qui est fixé par les interactions entre les surfaces

L'énergie de surface résulte des forces d'attraction et de répulsion existantes entre les matériaux présents au voisinage de la zone de séparation de chacune des phases. Cette énergie est représentée par la tension superficielle, La mesure de l'énergie libre de surface d'un solide est déduite de la mesure de l'angle de contact et des tensions superficielles du liquide et du solide avec l'air. La détermination de l'angle de contact permet d'évaluer l'affinité d'une surface vis-à-vis d'un liquide.

Dans le cas du mouillage partiel, la partie mouillée de la surface est délimitée par une ligne de contact où les trois phases se rencontrent : le liquide de la goutte, l'air et la phase du substrat solide. La forme de la goutte et son angle de contact sont fixées par le paramètre d'étalement E défini comme :

$$E = \sigma_{\text{solide/air}} - \sigma_{\text{liquide/air}} - \sigma_{\text{solide/liquide}} \quad \text{Eq. 3-18}$$

où $\sigma_{\text{solide/air}}$, $\sigma_{\text{liquide/air}}$ et $\sigma_{\text{solide/liquide}}$ sont respectivement les tensions de surface solide/air, liquide/air et solide/liquide.

L'équilibre d'une goutte de liquide déposée sur une surface est décrit par l'équation de Young [Darque03]:

$$\sigma_{\text{liquide/air}} \cdot \cos \theta + \sigma_{\text{solide/liquide}} = \sigma_{\text{solide/air}} \quad \text{Eq. 3-19}$$

Le paramètre que nous allons déterminer est l'angle θ qui va donc nous permettre de déduire quel type de contact existe entre nos supports et nos fluides.

3.4.2 Mesure de la tension liquide / air

La mesure de la tension de surface liquide / air a été effectuée sur trois fluides à température ambiante : le PVA, le silicone S1 et le miel. La *Figure 3-17* montre le cas de la

mesure pour le PVA. Il est important de bien distinguer les contours de la goutte pour avoir une bonne précision de la mesure finale. La mesure est faite en statique car bien que les solvants employés (l'eau et le xylène) soient volatiles les pertes de matière par évaporation durant le temps de mesure sont négligeables (voir paragraphe 3.5.3.1).



Figure 3-17 : Photographie d'une goutte pendante de PVA permettant de mesurer la tension de surface liquide / air

Chaque mesure a été réalisée 10 fois. Pour le PVA, la valeur trouvée est de $\sigma_{PVA/air} = 47,6 \text{ mN} / \text{m}$; le silicone S1 a pour tension de surface $\sigma_{S1/air} = 20,5 \text{ mN} / \text{m}$. Enfin, le miel présente comme valeur $\sigma_{miel/air} = 69,8 \text{ mN} / \text{m}$.

3.4.3 Contact fluide – support

La détermination du type de contact entre le moule et le fluide se fait à l'aide de la mesure de l'angle de contact.

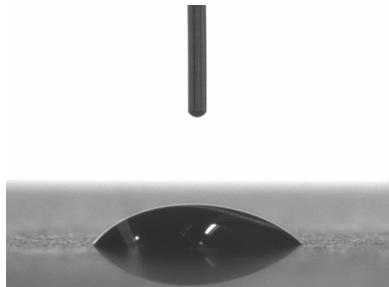


Figure 3-19 : Photographie d'une goutte posée de PVA sur le néoprène

L'angle de mouillage obtenu dans le cas du contact du PVA sur la céramique recouverte de néoprène à 80°C est de 87°. Or le contact entre le néoprène et le PVA est amélioré lors du procédé industriel à l'aide d'un primaire d'adhésion. L'angle de contact devient alors 61°. Le mélange d'adhésion remplit donc bien sa fonction et on peut considérer que le contact entre le support et le PVA est « collant ».

L'angle de contact a également été mesuré entre le silicone S1 et le moule en plastique. L'angle de mouillage obtenu est de 54,3°. De même que dans le cas du PVA, l'angle de contact étant inférieur à 90°, le contact entre le moule et le silicone S1 peut être considéré comme « collant ».

Le contact entre le moule et le fluide dans les cas traités sera modélisé à l'aide d'un contact collant sous Forge3.

3.5 Essais de trempage expérimentaux

Pour valider le modèle numérique développé sous Forge3, il est nécessaire de réaliser des essais expérimentaux modèles.

3.5.1 Développement d'un appareil- prototype expérimental de trempage

La machine de trempage employée (*Figures 3-19 et 3-20*) a été conçue par le bureau d'étude du Cemef et réalisée au sein de ses ateliers. Elle permet de descendre dans un fluide maintenu à une certaine température, un moule de forme cylindrique et de le remonter. Celui-ci aura alors une certaine épaisseur du fluide sur sa surface.

Le mouvement réalisé par cette machine de trempage permet une descente suivie d'une remontée verticale à une vitesse constante comprise entre 1 et 10 mm/s et sur une distance de 300 mm maximum. Il est possible après la remontée verticale de réaliser un mouvement de rotation de 180° selon un axe perpendiculaire au mouvement vertical. Le temps de séjour du moule dans le bain peut être variable à souhait. Le bain de trempage n'est pas alimenté en fluide au cours du trempage : le volume du liquide est donc constant au cours du temps et équivaut à 3dl.

Pour réaliser du trempage en température, il est possible de placer sous le bain de trempage une plaque chauffante permettant son maintien en température. Le chauffage du moule se fait en étuve avant le trempage puis est placé sur la machine de trempage à température ambiante.

La conception de ce prototype de trempage a été indispensable au déroulement de cette thèse pour valider les développements numériques et pour une meilleure compréhension du précédé de trempage.

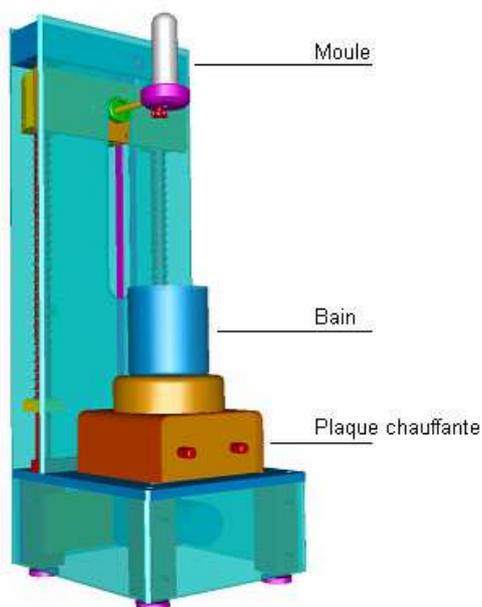


Figure 3-19 : Schéma de la machine de trempage



Figure 3-20 : Photo de la machine de trempage

3.5.2 Mesure des épaisseurs

Le paramètre-clef de cette étude est la prédiction de l'épaisseur extraite lors de remontée, et sa variation autour et le long du moule. La méthode pour déterminer l'épaisseur extraite est basée sur l'analyse d'image. Une photographie à l'aide d'un appareil Nikon D100 avec un objectif macroscopique de 100 mm du moule est prise en contre jour avant et après trempage ; les deux clichés sont ensuite comparés pour calculer l'épaisseur de fluide extrait. Le contre jour se fait en plaçant un éclairage derrière le moule et en diffusant la lumière à l'aide d'une feuille de papier calque. L'avantage de cette méthode, en plus d'être précise, rapide et facile, est qu'il est possible de déterminer l'épaisseur à une instant bien précis au cours de la remontée. La photographie est prise après une remontée de 65 mm du moule.

La *Figure 3-21 a/* montre une photographie prise en contre jour du moule seul et la *Figure 3-21 b/* présente l'image du même moule mais après trempage dans du miel. Les mesures ne se font donc pas sur l'ensemble de la circonférence du moule mais uniquement sur deux côtés. Le moule étant cylindrique, nous supposons donc que l'épaisseur, à une même hauteur donnée, est la même tout autour de la circonférence. L'analyse se fait numériquement en établissant une échelle entre nombre de pixels et mm.



Figure 3-21 : Photographie à contre-jour a/ du moule et b/ du moule après trempage dans le miel

Pour une meilleure précision, les mesures des épaisseurs expérimentales se font perpendiculairement selon l'axe de symétrie du moule, même dans l'hémisphère inférieur (*Figure 3-22*). Il en est fait de même numériquement.

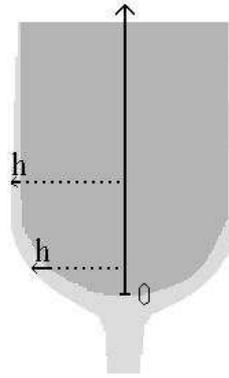


Figure 3-22 : Mesure des épaisseurs

3.5.3 Erreurs sur l'épaisseur

Il est important de prendre les photographies en contre jour pour une bonne précision des mesures. Ceci permet une propagation sans réflexion des rayons lumineux : la délimitation des contours de la surface libre est plus facile à obtenir sur une image prise en contre jour que sur une obtenue à l'aide d'éclairage sur les côtés.

Nous avons comparé deux résultats de mesures d'épaisseurs sur exactement le même trempage mais dans deux conditions d'éclairages différentes : le cas où le moule est éclairé en contre jour et celui où il est illuminé à l'aide de deux spots placés de chaque côté.

Les mesures expérimentales sont sources d'erreurs dont il faut tenir compte. Les principales raisons de ces erreurs sont la délimitation de la surface libre et la détermination de l'échelle. La valeur de cette erreur est de l'ordre de 10% : elle a été déterminée à partir des différences d'épaisseurs obtenues entre différents trempage dans les mêmes conditions.

Des erreurs autres que sur les mesures d'épaisseurs peuvent exister. Le réglage de la vitesse en est une source : en effet, cette commande se fait à l'aide d'un bouton que l'on tourne pour obtenir la vitesse désirée mais la graduation n'est pas très précise. La vitesse de 10 mm/s est la valeur butoir du bouton et est donc celle qui conduit à de moins grandes erreurs sur ce paramètre : elle est donc celle choisie pour la comparaison entre l'expérimentation et la modélisation.

3.5.4 Influences de paramètres physiques

Un autre intérêt d'effectuer des expériences de trempage avec la machine-prototype en plus de la comparaison avec les résultats numériques est d'étudier l'influence de certains paramètres physiques. Dans un premier temps, nous avons quantifié l'importance de l'évaporation du solvant sur l'épaisseur. Nous avons également étudié l'importance sur l'épaisseur du fluide extrait des variations de vitesse de remontée et de la viscosité.

3.5.4.1 Influence de l'évaporation

Les silicones sont en solutions dans un solvant volatil : le xylène. Son évaporation doit donc être un facteur diminuant l'épaisseur au cours du trempage. La mesure de l'influence de ce paramètre est importante pour savoir s'il est nécessaire d'en tenir compte lors de la modélisation numérique.

Pour mesurer l'importance de l'évaporation du xylène, nous avons placé une épaisseur de 0,5 mm de silicone S1 dans une coupelle et nous avons regardé l'évolution du poids de l'ensemble. La variation du poids au cours du temps nous a permis de déterminer l'évolution de l'épaisseur. L'expérience s'est faite à 30°C en étuve sous évacuation d'air (pour ne pas la saturer en xylène). Le temps caractéristique du trempage est de moins de 5 minutes.

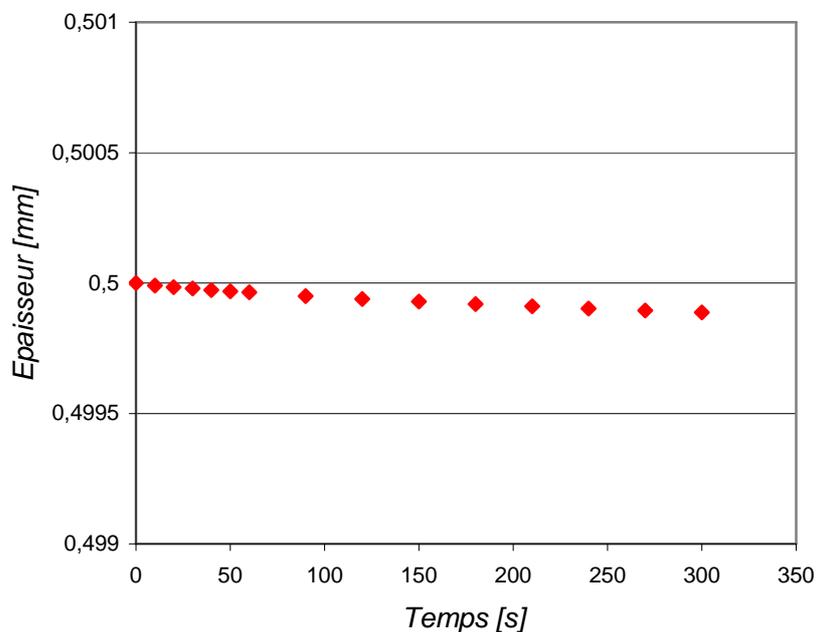


Figure 3-23 : Evolution de l'épaisseur du silicone S1 à 30°C pendant 5 minutes

Comme le montre la *Figure 3-23*, la perte d'épaisseur en 5 minutes est tout à fait négligeable. Nous considérerons donc l'évaporation du solvant comme nulle.

Le PVA, qui est une solution aqueuse, peut également présenter un problème d'évaporation puisque le trempage s'effectue en température. Cependant, même si le moule en céramique est chauffé à 80°C, nous démontrons plus tard que la température d'interface avec le fluide est de 38°C. Par conséquent, comme pour le cas du silicone, nous pouvons négliger l'évaporation.

3.5.4.2 Influence de la vitesse de remontée du moule

Un des paramètres physiques influençant l'épaisseur extraite au cours du trempage est la vitesse de remontée du moule. Les *Figures 3-24* et *3-25* présentent les épaisseurs mesurées

pour différentes vitesses de remontée du moule variant de 1 mm/s à 10 mm/s. Le premier constat est que plus la vitesse est grande, plus l'épaisseur extraite est importante. En effet, plus on retire rapidement le moule, moins le fluide a le temps de s'écouler par gravité. La deuxième remarque est que au dessus d'une certaine vitesse, ici 5 mm/s, l'épaisseur reste la même malgré l'augmentation de vitesse. Il est alors possible de supposer que le moule a alors atteint la quantité maximale de matière qu'il puisse « accrocher » et qu'il est saturé.

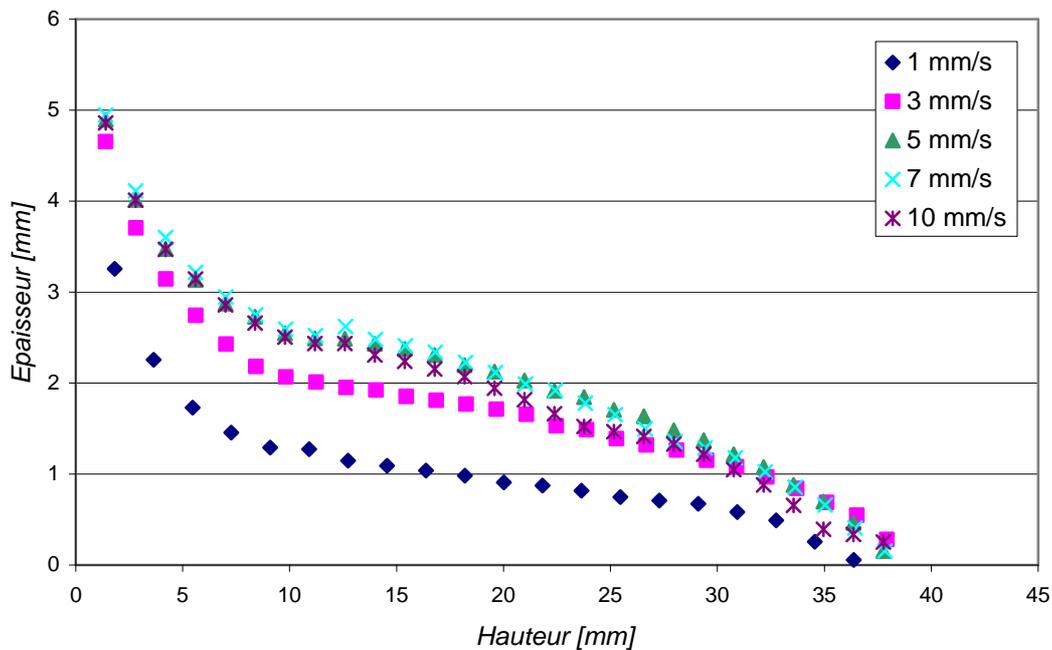


Figure 3-24 : Influence de la vitesse de remontée sur les épaisseurs extraites – cas du miel

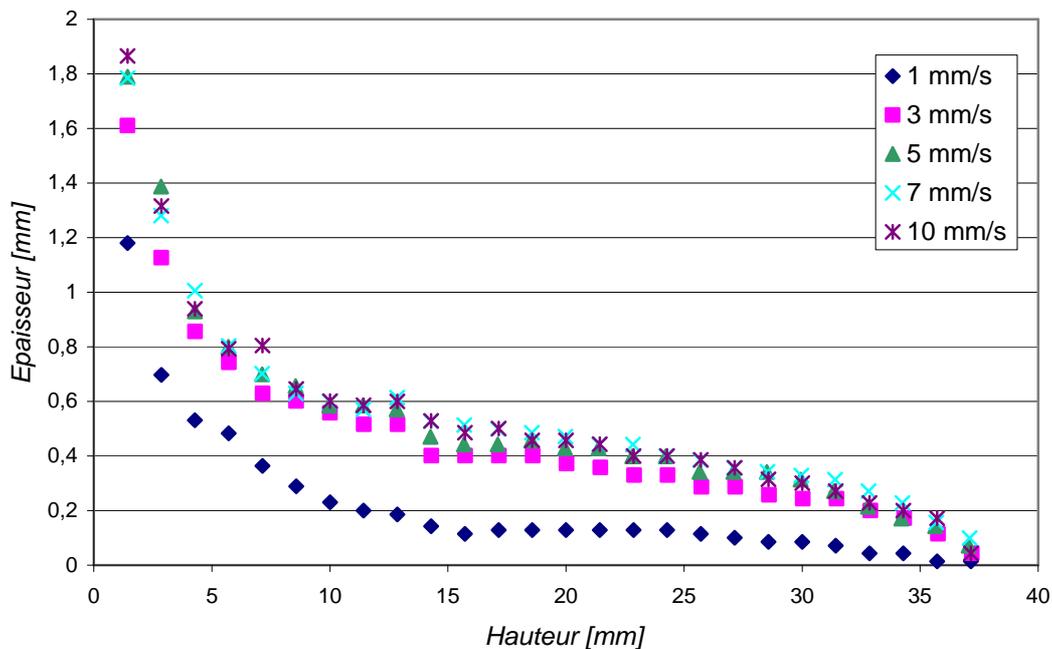


Figure 3-25 : Influence de la vitesse de remontée sur les épaisseurs extraites – cas du PVA

3.5.4.3 Influence du bain de trempe

La Figure 3-26 donne les épaisseurs extraites pour les trois fluides étudiés, miel, silicone S1 et PVA, à une vitesse de remontée de 10 mm/s. Les raisons des différences d'épaisseurs entre ce trois liquides sont liées aux différences des paramètres physiques : tension de surface, viscosité et masse volumique.

Le miel est celui présentant la plus grande épaisseur : il s'agit du fluide présentant la plus grande viscosité, la importante masse volumique et la plus grande valeur de tension de surface.

Le silicone S1 et le PVA présentent des épaisseurs similaires. Entre ces deux fluides, sur une gamme de cisaillement de 1 à 10 s⁻¹, présente une différence de viscosité avec un facteur 10, le silicone S1 étant le plus visqueux. Le PVA présente une plus grande tension de surface, facteur venant s'opposer aux forces gravitationnelles et réduisant ainsi les pertes de matière ; c'est pourquoi, malgré une viscosité plus forte, le trempage dans le silicone S1 ne présente pas une plus grande épaisseur que le PVA.

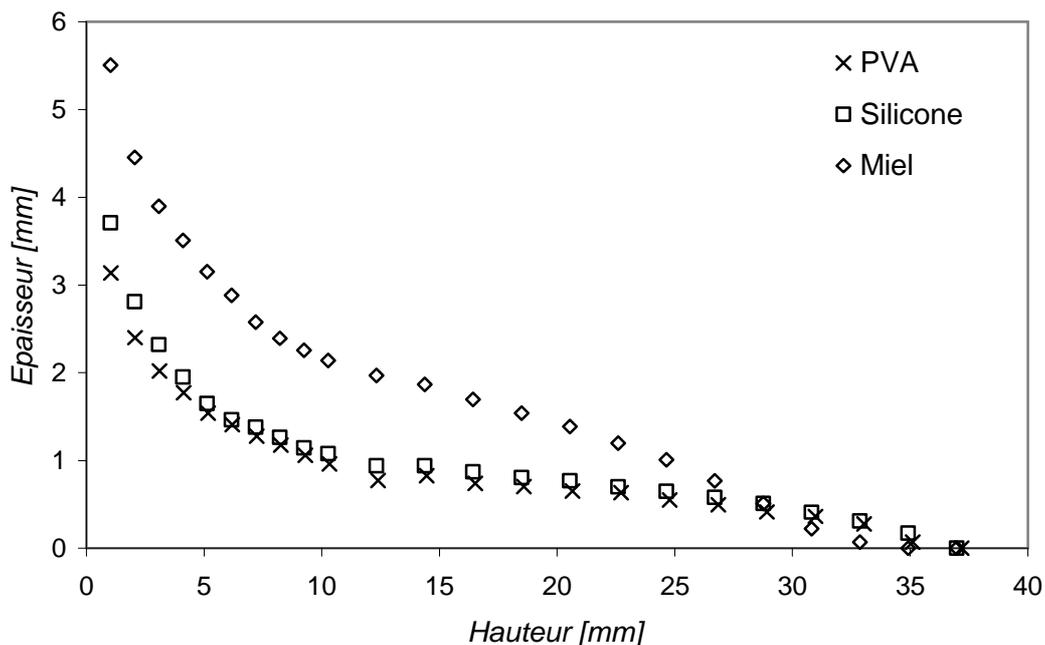


Figure 3-26 : Influence de la rhéologie sur les épaisseurs moyennes extraites à une vitesse de remontée de 10 mm/s

3.5.4.4 Trempage à chaud

La mise en forme des gants par trempage est un procédé se réalisant à partir d'un moule et d'un bain chauffé. Le gradient de température n'entraîne pas de solidification ou gélification mais permet une fluidification du PVA.

Nous avons cherché à reproduire les conditions en température du trempage. Le moule est chauffé préalablement à 80°C puis est plongé dans un bain à 30°C. Comme la montre la *Figure 3-27*, l'épaisseur extraite lors d'un trempage avec gradient de température conduit à une épaisseur extraite légèrement plus fine que celle obtenue à l'ambiante. Les différences ne sont pas très grandes car comme nous le montrerons dans le *Chapitre 6*, la température en surface du moule au moment du trempage se stabilise rapidement à 39°C et non plus 80°C. On passe donc d'une viscosité de 0,43 Pa.s à 25°C à une de 0,31 Pa.s à 39°C : la différence est faible ce qui explique le faible écart d'épaisseur entre les deux cas.

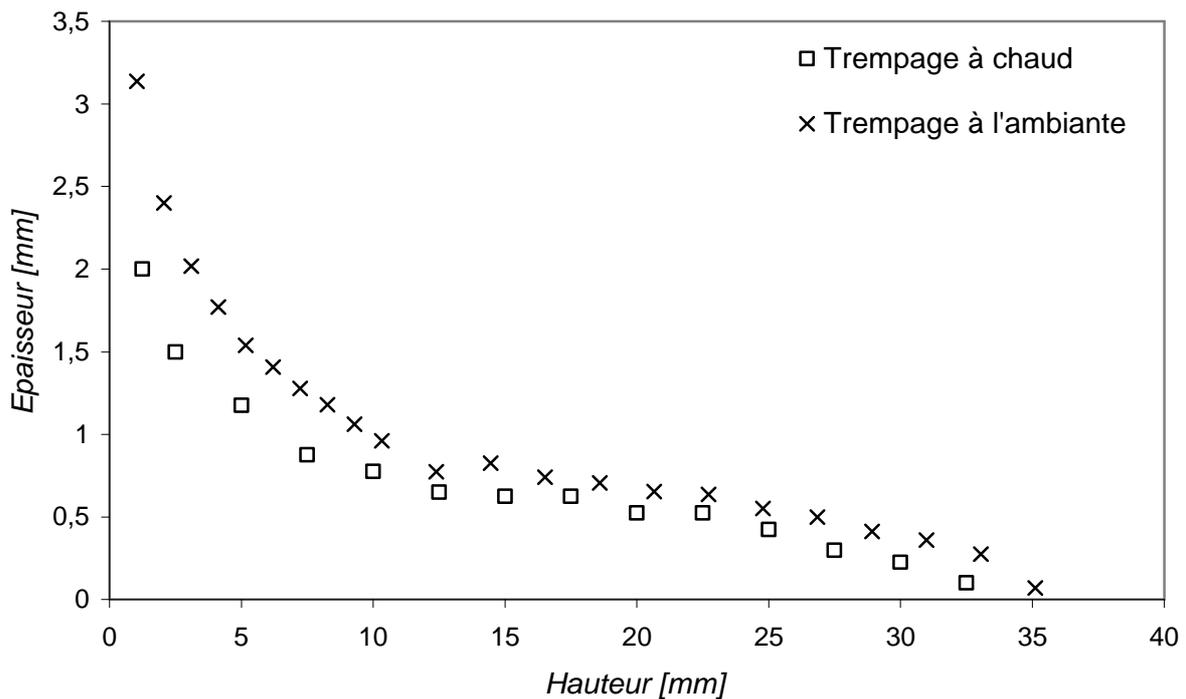


Figure 3-27 : Comparaison des épaisseurs extraites entre trempage à chaud et trempage à l'ambiante

Ce chapitre expérimental avait pour but d'apporter une meilleure connaissance des procédés et matériaux employés lors des trempages étudiés. Nous avons déterminé les lois de comportement des bains de trempage, leurs tensions de surface avec l'air et le type de contact existant entre le moule et le liquide. Les essais expérimentaux de trempage sur la machine-prototype de trempage conçue et fabriquée au CEMEF nous serviront de références et de points de comparaison avec les résultats numériques.
