

Influence de la tension de surface

Le dernier paramètre physique dont nous avons étudié l'influence est lié aux forces de surface. L'intérêt de l'emploi de la simulation numérique est qu'elle nous permet d'étudier le rôle de ce facteur sur la forme et l'aspect de la surface libre, ce qui, expérimentalement, est difficile à réaliser.

5.3.1 Influence de la tension de surface sur l'épaisseur extraite

5.3.1.1 *Variation de la taille de l'épaisseur en fonction de la tension de surface*

L'influence de la tension de surface sur l'épaisseur a été étudiée pour deux cas de fluides newtoniens : le premier avec une viscosité de 13 Pa.s (*Figure 5-10*) et le second avec une viscosité de 0,8 Pa.s (*Figure 5-11*).

Dans le premier cas (*Figure 5-10*), la tension de surface n'a pas une réelle influence: l'épaisseur reste constante lorsque varie le facteur tension interfaciale. De légères différences sont tout de même à noter dans la région transitoire mais cela peut rester négligeable. Par conséquent, quand la viscosité est très grande, elle a peu d'influence sur le rôle de la tension de surface.

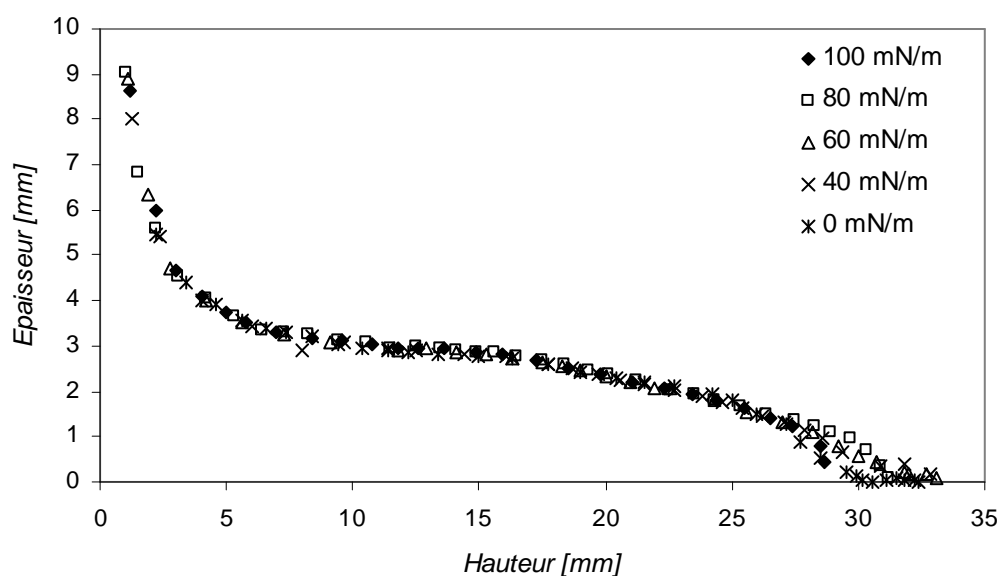


Figure 5-10 : Influence de la tension de surface pour un fluide newtonien de viscosité 13 Pa.s à une remontée de 50 mm

Par contre, dans le deuxième cas où la viscosité est plus faible (*Figure 5-11*), la tension de surface joue un rôle important sur la forme du film extrait. Pour une faible tension de surface, la matière se répartit tout le long du moule depuis la hauteur de trempe. Pour une valeur plus grande, cette hauteur est perdue et on retrouve le phénomène de décrochement de matière au cours de la remontée déjà observé à très faible viscosité. En fait, pour de grande tension de surface, la force qui vient s'appliquer est plus importante que celle fournie par le mouvement de remontée du moule. Malgré le contact collant, la matière se décroche pour venir se tasser dans les zones inférieures de l'épaisseur.

Pour contrecarrer ce phénomène, il faut diminuer la taille de maille. Or, une telle diminution conduit à des temps de calcul beaucoup trop importants comme nous l'avons montré dans le *Chapitre 4*. Il est possible comme dans les cas à faibles viscosités de reconstruire les courbes à grandes tensions de surface. Pour cela nous utilisons les mêmes méthodes décrites dans le sous paragraphe 5.1.2.1. Les résultats de cette extrapolation sont montrés sur la *Figure 5-12*.

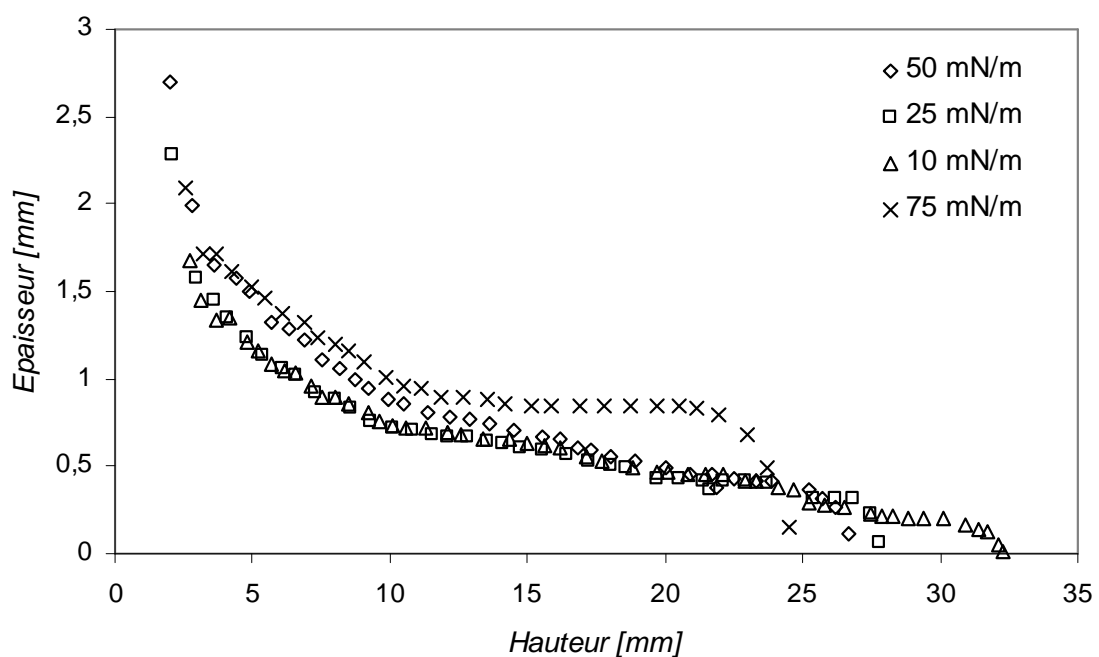


Figure 5-11 : Influence de la tension de surface pour un fluide newtonien de viscosité 0,8 Pa.s à une remontée de 50 mm

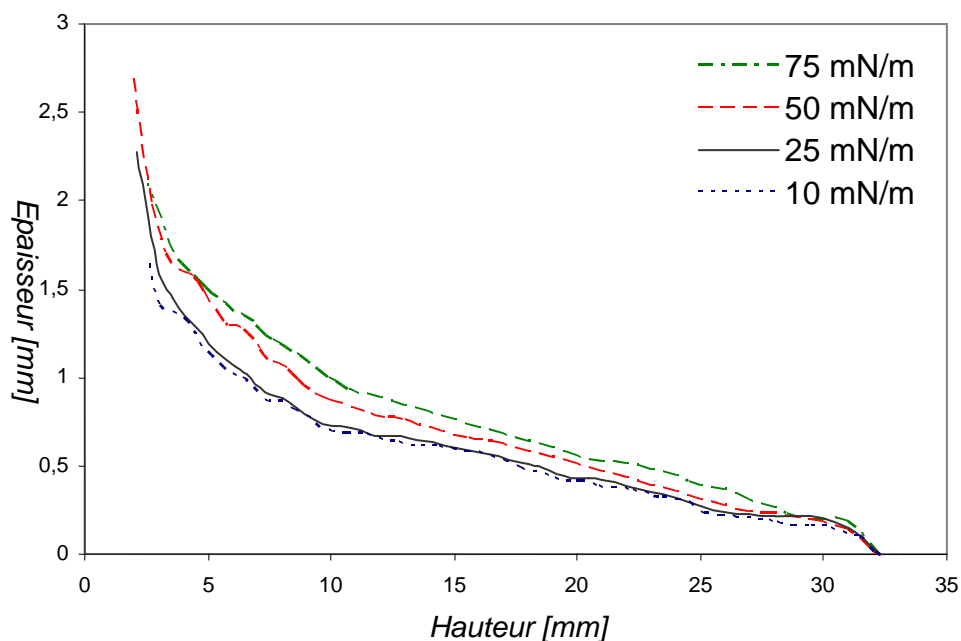


Figure 5-12 : Evolution de l'épaisseur en fonction de la tension de surface après corrections de la Figure 5-11

5.3.1.2 Variation de la masse de l'épaisseur en fonction de la tension de surface

La simulation numérique ne permet pas de décrire parfaitement les répartitions d'épaisseurs extraites à fortes tensions de surface. Cependant, comme il n'y a pas de perte de matière mais seulement une mauvaise répartition, il est possible d'évaluer son influence sur la masse extraite.

Dans les deux cas étudiés précédemment, nous avons déterminé la masse de matière extraite autour du moule pour les différentes valeurs de tension de surface. Les résultats obtenus sont donnés dans le *Tableau 5-2* pour le fluide newtonien de viscosité 13 Pa.s et dans le *Tableau 5-3* pour le fluide newtonien de viscosité 0,8 Pa.s.

Tension de surface [mN/m]	0	40	60	80	100
Aire sous la courbe [mm ²]	60,9	64,6	63,4	66,6	62,7
Masse de miel autour du doigt [g]	30,7	32,6	31,9	33,6	31,6

Tableau 5-2 : Masse retirée autour du moule à H = 50 mm pour un fluide newtonien de viscosité 13 Pa.s

Tension de surface [mN/m]	10	25	50	75
Aire sous la courbe [mm²]	17,6	19,4	21,8	22,5
Masse de PVA autour du doigt [g]	8,8	9,7	10,9	11,2

Tableau 5-3 : Masse retirée autour du moule à H = 50 mm pour un fluide newtonien de viscosité 0,8 Pa.s

La Figure 5-13 présente l'évolution de la masse, ramenée à un nombre adimensionnel, en fonction de la tension de surface. Lorsque la viscosité est de 0,8 Pa.s, le poids augmente en même temps que la tension de surface avec une pente de 0,0035. Par contre dans le cas où la viscosité est de 13 Pa.s, le poids reste quasiment stable avec une pente de seulement 0,0004.

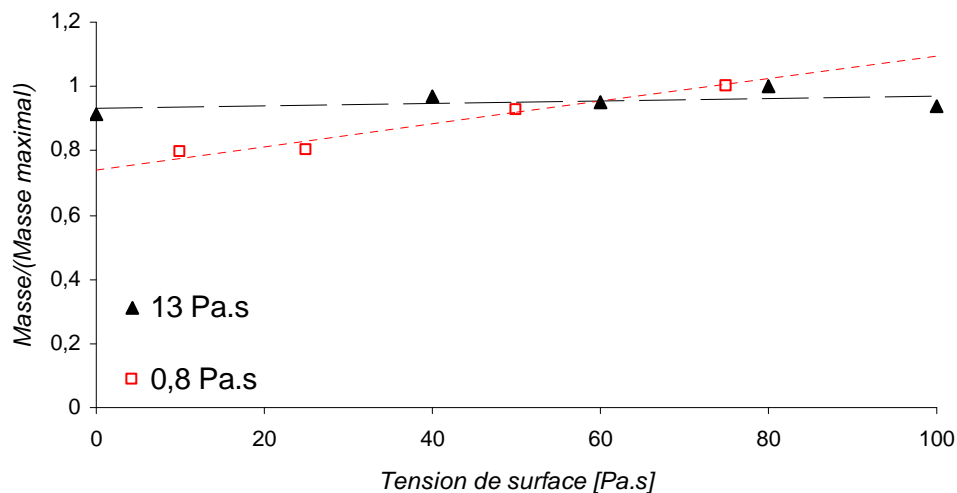


Figure 5-13 : Variation de la masse en fonction de la tension de surface et de la viscosité

La tension de surface a un rôle plus important dans les cas de fluides à basses viscosités alors qu'à plus forte viscosité, la négliger ne serait pas une approximation grossière. Weinstein et al. [Weinstein01] rappelle que la tension de surface peut être négligée dans les cas où le nombre capillaire est grand. Comme le montre le Tableau 5-4, nos résultats sont bien en accord avec cette théorie : à grand nombre capillaire, la tension de surface peut être négligée.

	Fluide 1 $\mu = 13 \text{ Pa} \cdot \text{s}$				Fluide 2 $\mu = 0,8 \text{ Pa} \cdot \text{s}$			
Tension de surface [mN/m]	40	60	80	100	10	25	50	75
<i>Ca</i>	3,25	2,17	1,63	1,30	0,5	0,2	0,1	0,07

Tableau 5-4 : Dépendance entre nombre capillaire et propriété du fluide

Pour le cas où la tension de surface n'est pas négligeable, la masse extraite autour du moule évolue logarithmiquement en fonction de la tension de surface comme le montre la *Figure 5-14*. L'équation permettant d'établir cette relation est la suivante :

$$m = 1,25 \ln(\sigma) + 5,87 \quad \text{Eq. 5-10}$$

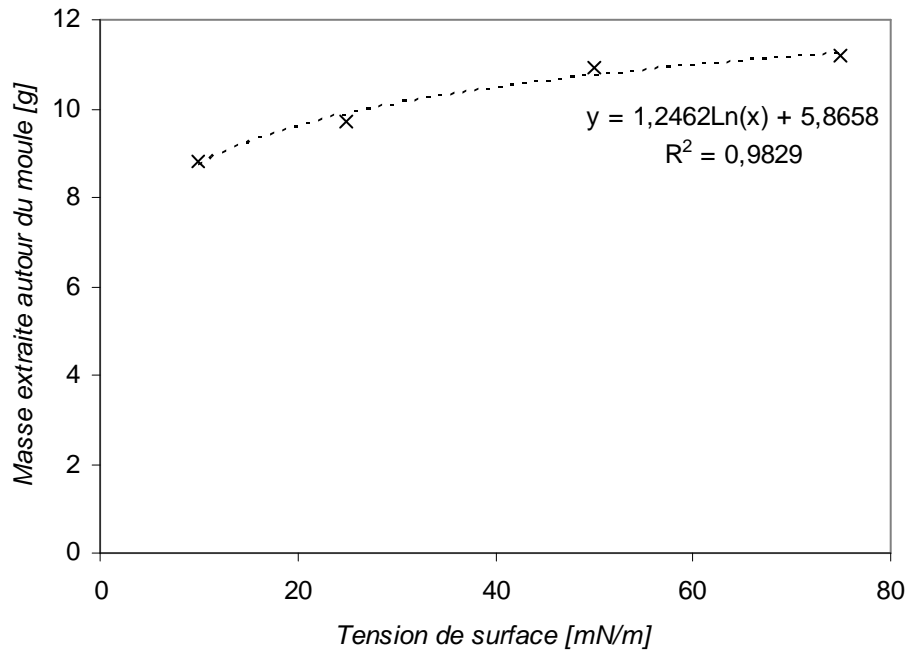


Figure 5-14 : Graphique représentant la relation entre la masse retirée autour du moule et la tension de surface pour un fluide newtonien de masse volumique 1390 kg/m^3 , à une vitesse de remontée de 10 mm/s et de viscosité $0,8 \text{ Pa.s}$

Les paramètres *A* et *B* cette fois est fonction de la masse volumique, la vitesse de remontée et la viscosité.

5.3.2 Influence de la tension de surface sur la rupture du fil

Nous avons regardé l'influence de la tension de surface sur la rupture du filament dans le cas d'un fluide newtonien de viscosité 10 Pa.s , de densité $1,4$ et à une vitesse de remontée de 10 mm/s . Nous procédons de même que dans le paragraphe 5.1.2.3 pour déterminer l'influence de la tension de surface sur la hauteur de rupture du filament.

La *Figure 5-15* donne l'évolution linéaire de la hauteur de rupture en fonction de la tension de surface. La relation numérique trouvée dans ce cas est la suivante :

$$H_r = -0,14\sigma + 31,34 \quad \text{Eq. 5-11}$$

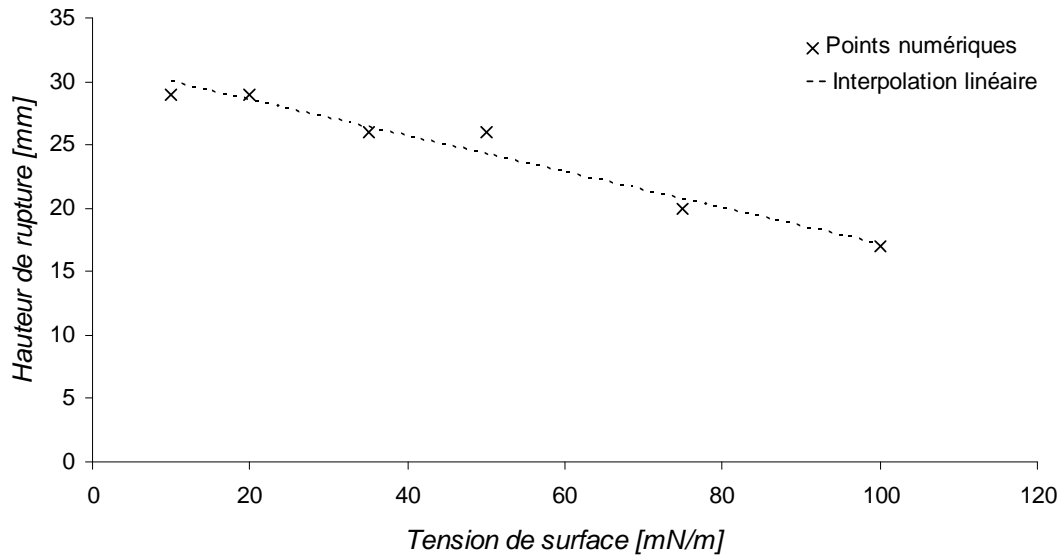


Figure 5-15 : Evolution de la hauteur de rupture en fonction de la tension de surface pour un fluide newtonien de masse volumique 1400kg/m^3 , à une vitesse de remontée de 10mm/s et de viscosité 10Pa.s

La Figure 5-18 montre la linéarité existante entre la tension de surface et le temps de rupture. La relation liant le temps t_r auquel se déroule la rupture à la tension de surface est :

$$t_r = -0,014\sigma + 3,13 \quad \text{Eq. 5-12}$$

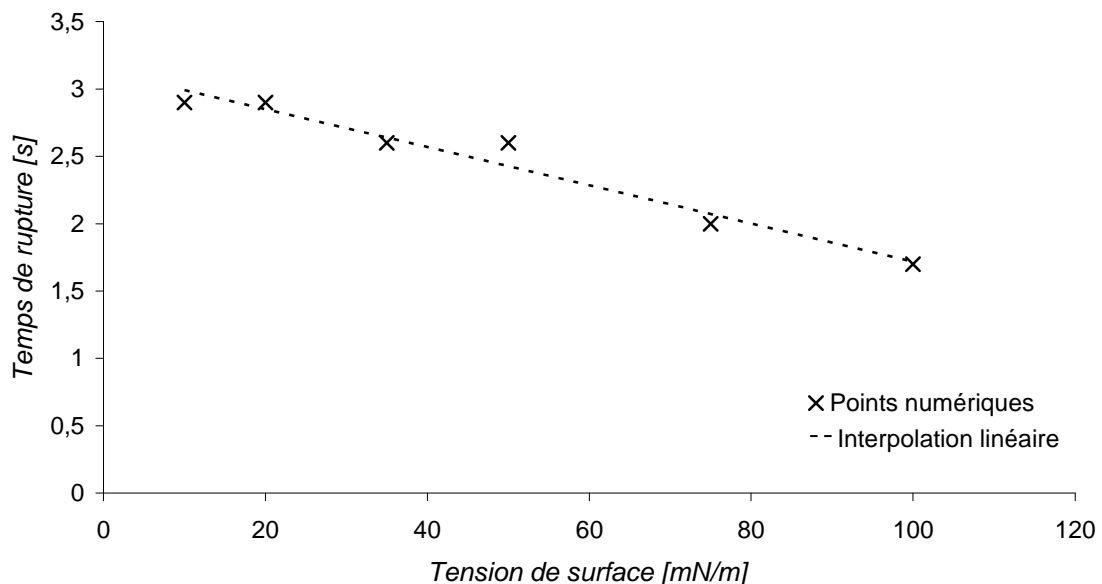


Figure 5-16 : Evolution du temps de rupture du filament en fonction de la vitesse de retrait pour un fluide newtonien de masse volumique 1400kg/m^3 , à une vitesse de remontée de 10mm/s et de viscosité 10Pa.s

Le temps de rupture ainsi que la hauteur de rupture évolue tout deux linéairement avec la tension de surface.

5.3.3 Compétition gravité – tension de surface

Comme nous venons de le montrer, dans les cas de fluides peu visqueux, la tension de surface joue un rôle important : plus sa valeur est grande, plus il a de matière extraite autour du moule. En fait, cette force vient s'opposer à la gravité qui est responsable de la perte de matière par écoulement. L'opposition entre la gravité et les forces de tension de surface ne se fait pas uniquement sur la masse mais également sur la forme de la surface libre au niveau de l'hémisphère inférieure du moule, là où les instabilités numériques sont inexistantes.

5.3.3.1 *Observations numériques*

Juste après le retrait du moule, à $H \approx 40\text{mm}$, une singularité dans la forme de l'épaisseur apparaît et est accentuée à plus forte tension de surface : dans la partie inférieure, l'épaisseur diminue (*Figure 5-17*). On pourrait penser au premier abord que l'épaisseur augmente continuellement le long du moule sous l'effet de la gravité mais ce n'est pas le cas. Du fait de la courbure du moule, la tension de surface joue un rôle important dans cette zone et conduit à cette diminution. La *Figure 5-18* montre le champ de vitesse dans l'épaisseur. La zone de diminution correspond à une zone de stagnation où la vitesse est plus faible que dans le reste de l'épaisseur. Ce phénomène apparaît temporairement juste après le retrait du moule et la formation du fil. Les forces de tension de surface à cet instant sont plus importantes que les forces gravitationnelles ce qui apporte cette courbure à la surface libre. Ce phénomène conduit à une diminution localisée de l'épaisseur. Rapidement, sous l'effet du poids de la matière, la gravité vient gommer cette singularité.

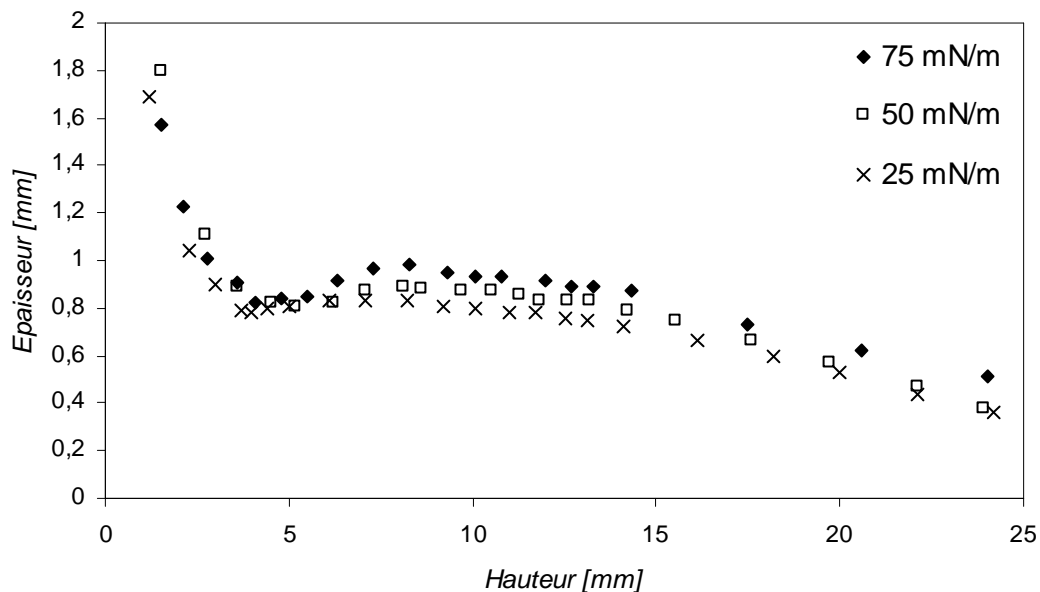
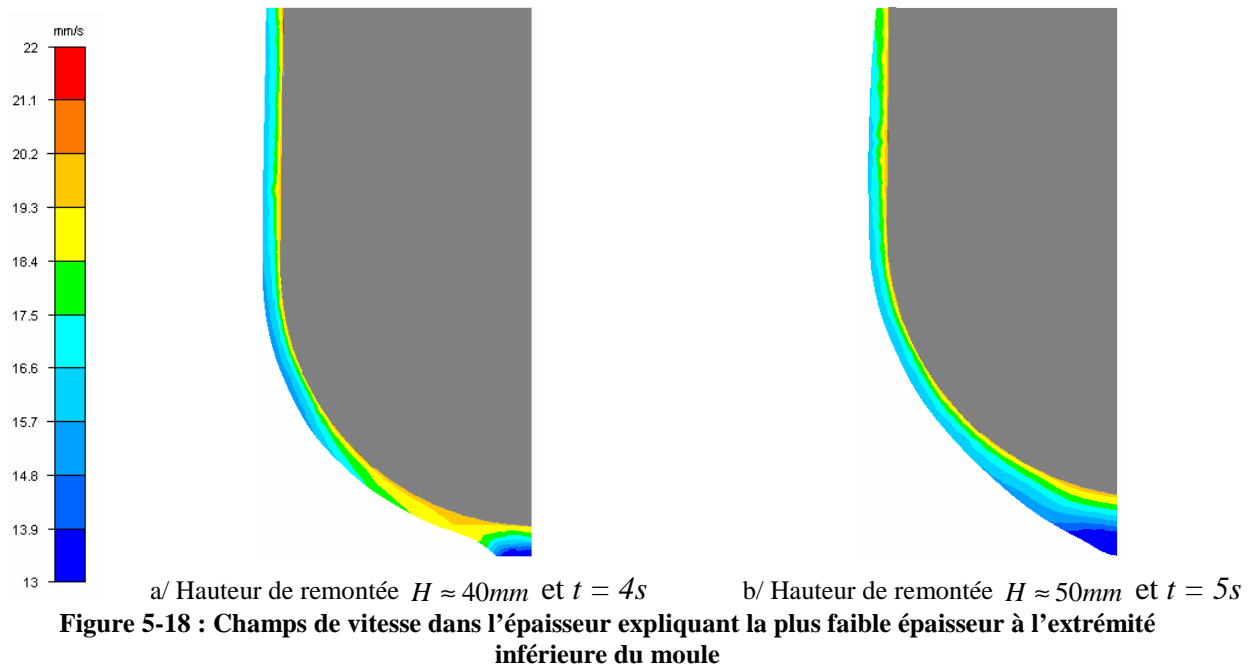


Figure 5-17 : Épaisseur en fonction de la hauteur avec variation de la tension de surface dans le cas d'un fluide newtonien de viscosité 0,8 Pa.s à une hauteur de retrait de 40 mm



5.3.3.2 Observations expérimentales

Pour vérifier que le phénomène de diminution d'épaisseur n'est pas liée à un artefact numérique mais bien à la compétition tension de surface / gravité, nous avons regardé expérimentalement la forme de la surface libre juste après émergence. Nous nous sommes intéressés au cas du miel car c'est le fluide étudié qui a la plus grande valeur de tension de surface.

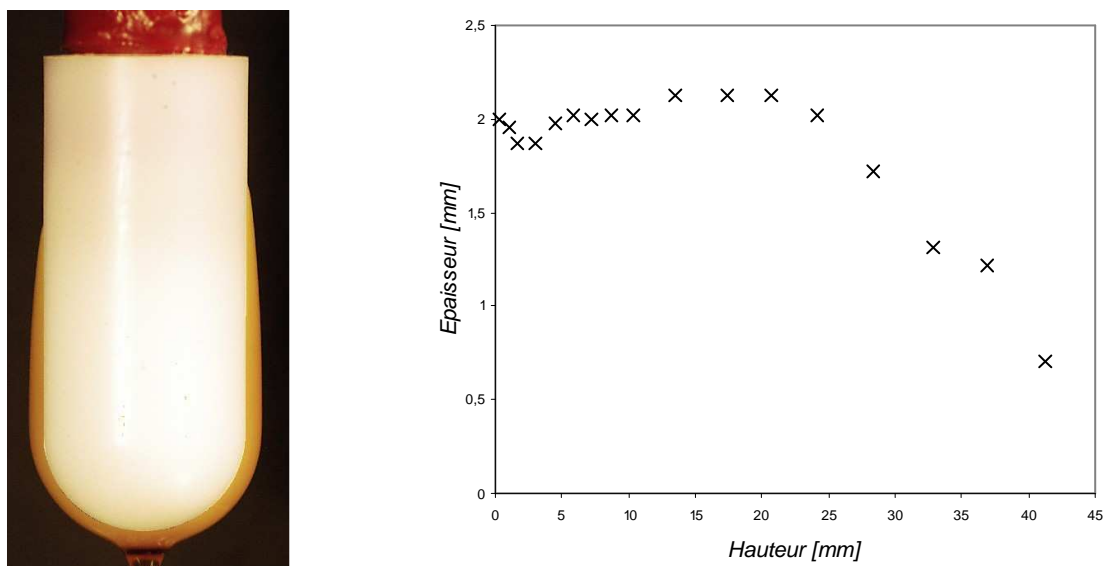


Figure 5-19 : Observation expérimentale de l'épaisseur de miel juste après retrait ($H \approx 40\text{ mm}$)

La *Figure 5-19* montre le résultat de cette étude expérimentale. Visuellement, on observe sur la *Figure 5-19 a/* une diminution d'épaisseur dans la partie inférieure du moule. Les mesures des épaisseurs *Figure 5-19 b/* confirment les observations visuelles faites. A l'aide de ces essais expérimentaux, nous confirmons donc bien que lors de la formation du fil, la tension de surface joue un rôle important dans la forme de la surface libre en s'opposant à la gravité.

5.3.4 Amélioration de l'aspect de la surface

Un intérêt plus numérique de l'utilisation de la tension de surface est le lissage de la surface de l'épaisseur et ainsi la réduction du risque de dégénérescence du maillage.

Dans des cas de faibles viscosités (ici $\eta = 0,1 Pa.s$), l'absence de la tension de surface conduit à un aspect de la surface très irrégulier et une perte de matière très anarchique au niveau inférieur du moule comme le montre la *Figure 5-20*. En plus de la perte de matière plus grande, le manque de tension de surface conduit à un maillage très déformé ce qui pose des problèmes de calcul : le maillage est dégénéré et amène à l'arrêt prématuré des calculs.

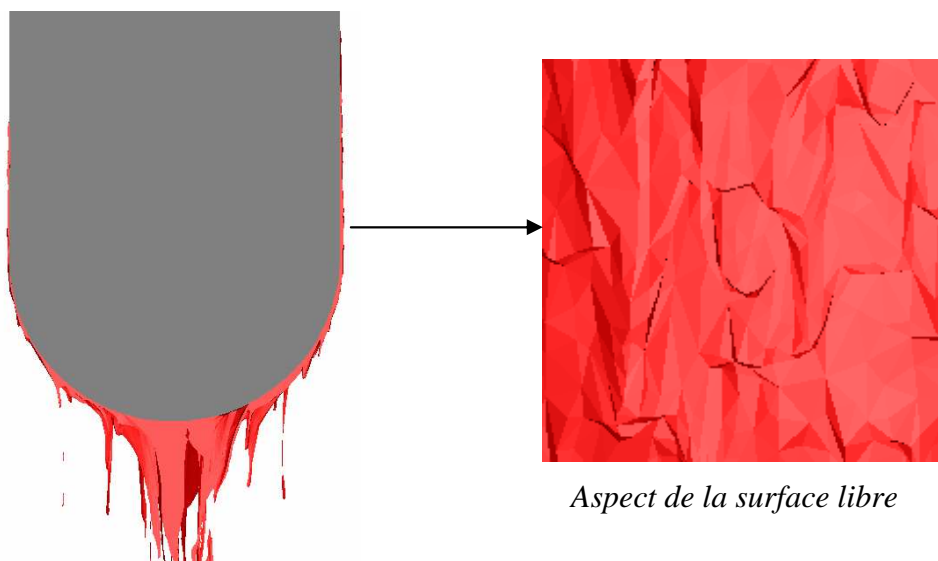


Figure 5-20 : Observation de l'état de surface sans tension de surface : nombreuses irrégularités

Par contre, pour le même cas mais avec les forces de tension de surface, on remarque sur la *Figure 5-21* que la surface est parfaitement lisse et que les pertes anarchiques de matières observées *Figure 5-20* ne sont plus présentes. La tension de surface cherche à minimiser l'énergie de surface en réduisant la taille de la surface : les irrégularités sont ainsi gommées.

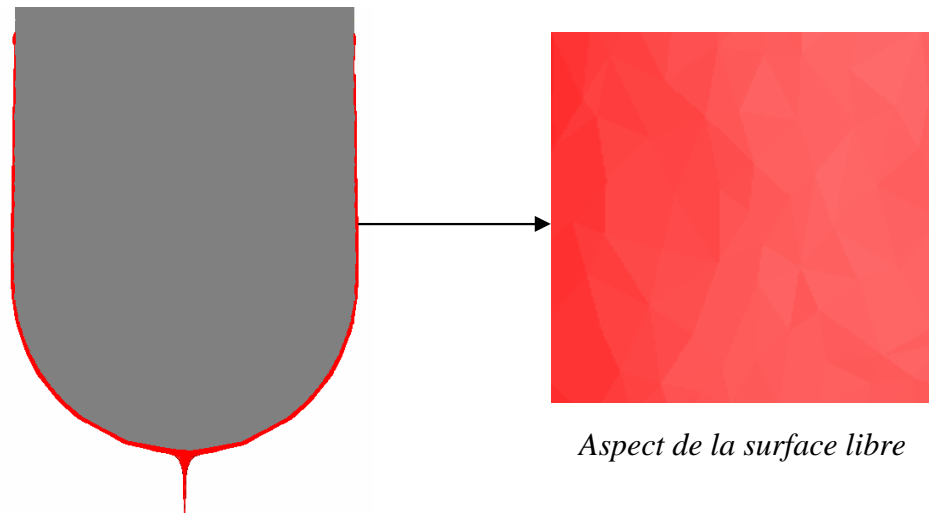


Figure 5-21 : Observation de l'état de surface avec tension de surface : gommage des irrégularités

5.4 Généralisation de l'influence des divers facteurs physiques

Nous venons de montrer l'influence de chaque paramètre physique isolé (viscosité, vitesse de remontée et tension de surface). Dans la suite de ce paragraphe, nous nous proposons de regrouper l'ensemble des observations faites pour tirer des conclusions communes concernant les études des masses retirées autour du moule ainsi que celle réalisée au sujet de la rupture du filament.

5.4.1 Masse extraite autour du moule

Dans les paragraphes précédents, nous avons montré que la masse retirée autour du moule varie logarithmiquement en fonction de la viscosité, de la vitesse de remontée et de la tension de surface :

$$\begin{cases} m = A \ln(\mu) + B \\ m = \alpha \ln(U_0) + \beta \\ m = K \ln(\sigma) + H \end{cases} \quad \text{Eq. 5-13}$$

avec les constantes A et B fonction de la masse volumique, de la vitesse de retrait et de la tension de surface, les constantes α et β fonction de la masse volumique, de la viscosité et de la tension de surface, et les constantes K et H fonction de la masse volumique, de la vitesse de retrait et de la viscosité.

Dans la suite de ce sous paragraphe, nous allons considérer l'influence de la masse volumique comme négligeable. La forme générale des équations 5-13 est :

$$\begin{aligned} m = & C_1 \ln(\mu) \ln(U_0) \ln(\sigma) + C_{21} \ln(\mu) \ln(U_0) + C_{22} \ln(\mu) \ln(\sigma) + C_{23} \ln(\sigma) \ln(U_0) \\ & + C_{31} \ln(\mu) + C_{32} \ln(\sigma) + C_{33} \ln(U_0) + C_4 \end{aligned} \quad \text{Eq. 5-14}$$

où C_i sont des constantes.

A l'aide des points numériques trouvés et donnés dans les *Figure 5-5*, *Figure 5-8* et *Figure 5-14*, il est possible de déterminer les valeurs des constants C_i . Ainsi, on trouve :

$$m = -1,57 \ln(\mu) \ln(U_0) \ln(\sigma) - 1,29 \ln(\mu) \ln(U_0) - 5,7 \ln(\mu) \ln(\sigma) - 0,81 \ln(\sigma) \ln(U_0) + 2,43 \ln(\mu) - 2,18 \ln(\sigma) - 3,04 \ln(U_0) - 1,50 \quad \text{Eq. 5-15}$$

5.4.2 Rupture du filament

La hauteur de rupture du filament est fonction de la masse volumique, de la tension de surface, de la viscosité et de la vitesse de retrait comme nous l'avons montré dans les paragraphes précédents :

- Lorsque la viscosité varie, nous avons trouvé la relation suivante :

$$H_r = 1,42\mu + 4,43 = 0,14\mu U_0 + 4,43 \quad \text{Eq. 5-16}$$

- La variation de vitesse nous a permis d'établir l'équation suivante :

$$H_r = 1,39U_0 + 5,9 = 0,14\mu U_0 + 5,9 \quad \text{Eq. 5-17}$$

- Et enfin, l'étude sur la tension de surface a démontré :

$$H_r = -0,14\sigma + 31,34 \quad \text{Eq. 5-18}$$

Les deux premières relations trouvées sont quasiment équivalentes. Les pentes trouvées est la même et vaut 0,14 mais l'ordonnée à l'origine est légèrement différentes. Les valeurs étant très proches, il est possible d'écrire la forme généralisée suivante :

$$H_r = 0,14\mu U_0 + 5,1 \pm 0,8 \quad \text{Eq. 5-19}$$

En considérant l'influence de la masse volumique négligeable, la forme généralisée de l'équation de la hauteur de rupture du filament est la suivante :

$$H_r = C_1\mu U_0\sigma + C_{21}\mu U_0 + C_{22}\sigma + C_3 \quad \text{Eq. 5-20}$$

Soit, sous forme numérale :

$$H_r = -0,0029\mu U_0\sigma + 0,32\mu U_0 + 0,057\sigma + 0,0042 \quad \text{Eq. 5-21}$$

5.5 Cas de trempage de moules à formes complexes

L'objectif de la modélisation numérique 3D par calcul direct du procédé de trempage est de pouvoir être appliquée au monde industriel. Nous allons nous intéresser ici au cas des entre doigts permettant la fabrication d'un gant et au cas d'un implant mammaire axisymétrique.

5.5.1 Cas du trempage d'un entre doigts

Pour des raisons de temps de calcul, il n'est pas possible actuellement de modéliser le trempage d'un gant complet. La principale difficulté de ce procédé est d'avoir une bonne répartition de la matière au niveau des entre doigts. En effet, du fait de l'existence des différentes courbures, il est difficile d'obtenir des épaisseurs épousant parfaitement la forme du moule.

5.5.1.1 *Géométrie du moule employé et difficultés*

Les principales difficultés du trempage au niveau de l'entre doigts sont liées au risque d'y obtenir une masse de matière continue (doigts palmés) ou au contraire de ne rien y retirer. Expérimentalement (observation sur les chaînes de production), il a été observé que les trois paramètres permettant d'optimiser la forme de l'épaisseur dans cette région sont la viscosité, la vitesse de remontée et la courbure. Nous allons regarder l'influence des deux premiers sur la forme de matière retirée. Selon les observations industrielles, la forme dans l'entre doigts permettant d'optimiser le trempage dans cette région est celle d'une « selle de cheval ». Le moule employé numériquement est présenté sur la *Figure 5-22* avec ses dimensions. Le paramètre « courbure » ne sera donc pas examiné ici et nous avons fait l'ensemble des tests numériques sur ce moule.

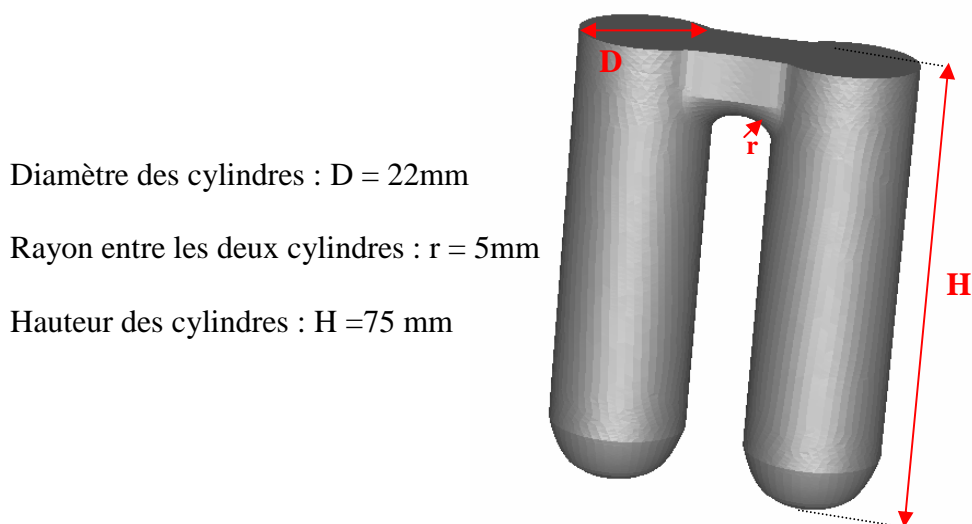


Figure 5-22 : Géométrie du moule pour étude de l'entre doigts

5.5.1.2 Influence des paramètres physiques

Dans ce sous paragraphe, nous avons étudié l'influence des deux principaux facteurs jouant un rôle dans l'entre doigts, c'est-à-dire la vitesse de remontée du moule et la viscosité du bain. La tension de surface a également une influence sur la forme de la matière retirée, mais il s'agit d'un paramètre qu'il est difficile de modifier expérimentalement et donc industriellement.

5.5.1.2.1 Influence de la viscosité

Nous avons examiné deux cas newtonien de différentes viscosités : le miel ($\mu = 13 Pa.s$) et le PVA ($\mu = 0,4 Pa.s$) à une vitesse de retrait de 50 mm/s.

Au cours de la remontée, à une hauteur de retrait 65mm, le champ de vitesse dans la masse de matière extraite dans l'entre doigts est dépendant de la viscosité (Figure 5-23 et système de coordonnées données Figure 5-24 a/). Dans le cas du PVA, le champ de vitesse devient négatif au centre de l'entre doigts (cas favorable) alors que pour le miel, il est tout le temps positif (cas défavorable).

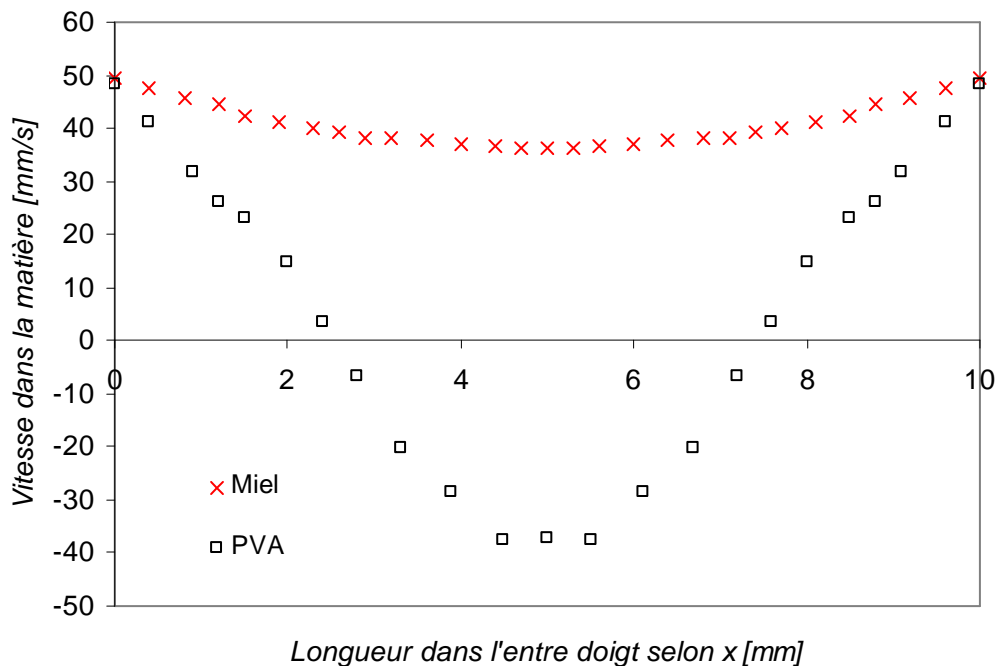


Figure 5-23 : Champ de vitesse selon z à une hauteur de retrait de 65mm dans l'entre doigts pour différentes vitesses de remontée dans le cas du miel

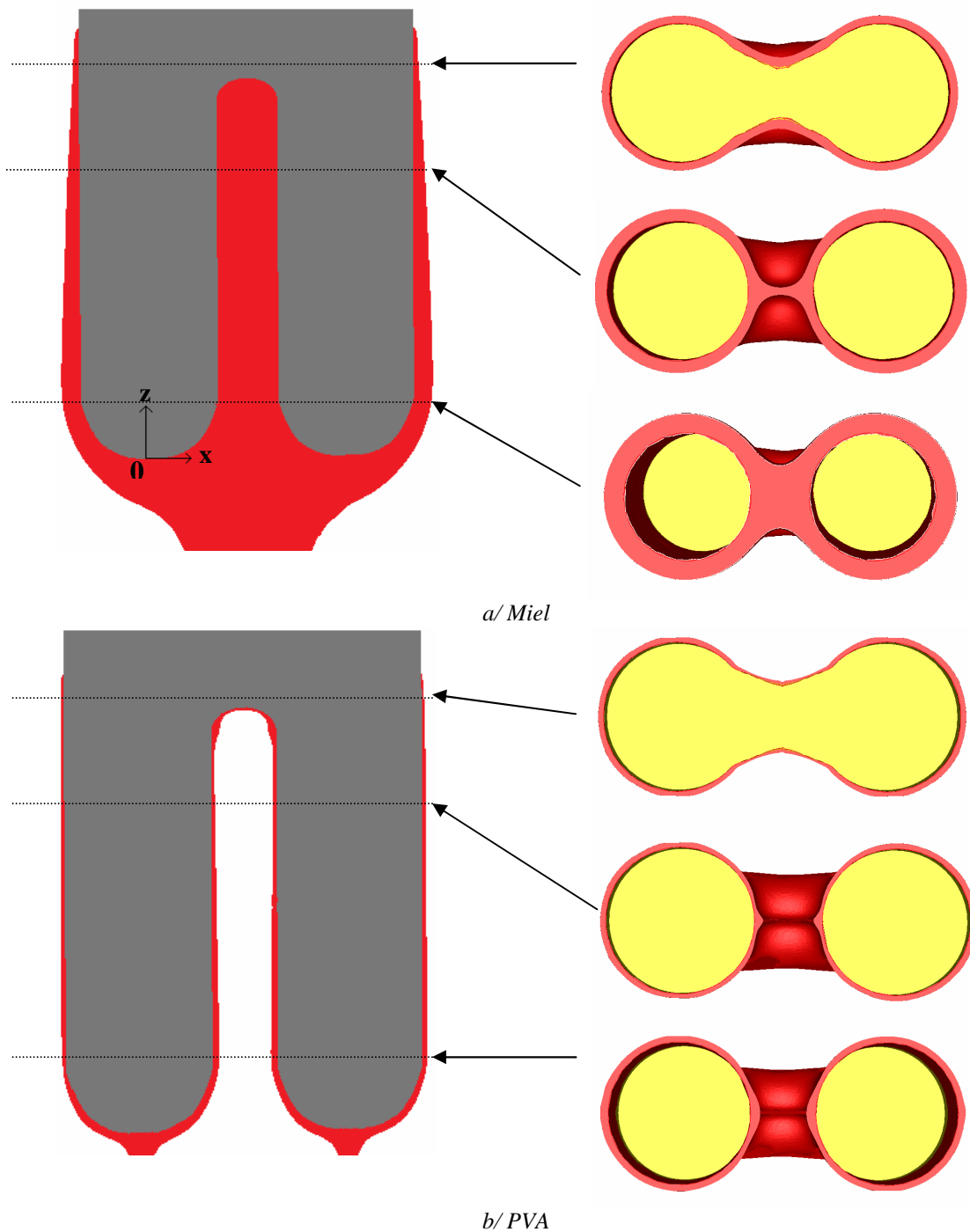


Figure 5-24 : Différences de comportements de la matière après extraction du mole hors du bain dans deux cas newtoniens : a/ le miel et b/ le PVA. A gauche, coupe au plan de symétrie, à droite, différentes coupes en vue de dessous

Cette répartition du champ de vitesse est directement liée à la forme finale de la matière extraite dans l'entre doigts. Après extraction complète du moule, dans le cas du PVA (Figure 5-24 b/), il est obtenu une fine épaisseur épousant la forme de l'entre doigts alors que dans le cas du miel (Figure 5-24 a/), le fluide y forme une masse de matière continue. La conclusion

de ces observations est que pour une même vitesse de remontée, pour obtenir une forme correcte du film dans l'entre doigt, il faut diminuer la viscosité.

5.5.1.2.2 Influence de la vitesse

La viscosité n'est pas le seul facteur jouant un rôle sur l'épaisseur retirée dans l'entre doigts. La vitesse de retrait est très importante également. Plus elle est faible, plus le champ de vitesse au cours de la remontée dans l'entre doigts tend vers des valeurs négatives (*Figure 5-25*). Dans le cas du miel, pour une vitesse de retrait de 1 mm/s, le champ de vitesse dans l'entre doigts devient négatif et laisse donc présager une forme finale comme celle de la *Figure 5-24 b/*. Par contre dans les cas où la vitesse est de 50 ou 10 mm/s pour le miel, le champ de vitesse reste positif et donc à la fin du trempage, la matière extraite autour du moule est de la forme de la *Figure 5-24 a/*.

Il est donc nécessaire de jouer sur le couplage vitesse de remontée / viscosité pour que la matière extraite adopte bien la forme du moule et pour obtenir les épaisseurs désirées.

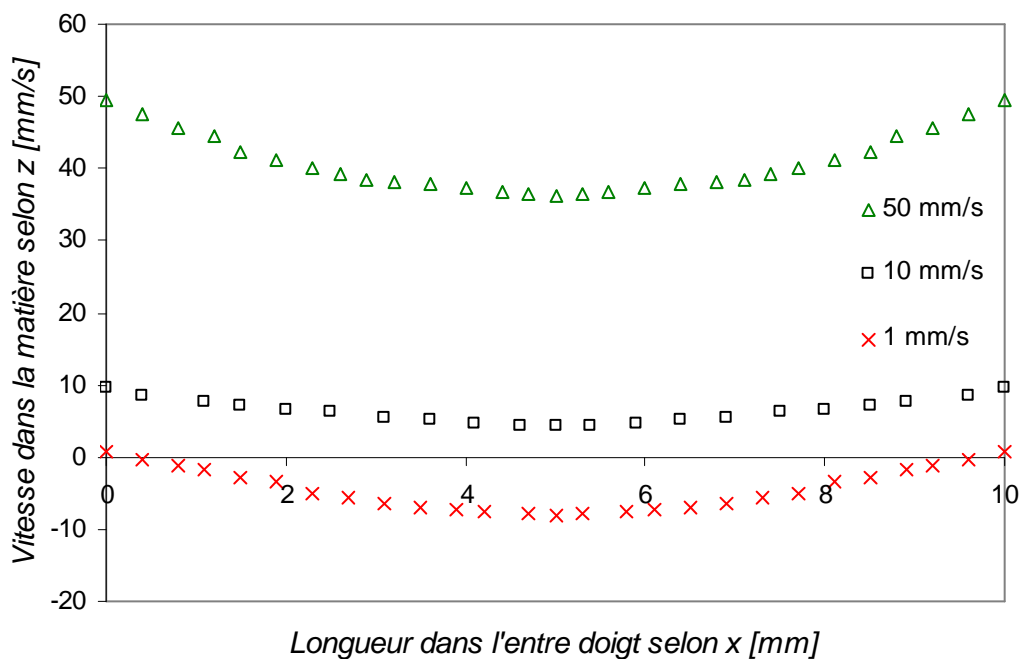


Figure 5-25 : Champ de vitesse dans l'entre doigts pour le miel à différentes vitesses

5.5.1.3 Forme de la matière dans l'entre doigts

Nous avons distingué trois cas de formes finales d'épaisseurs extraites. Dans le premier cas, lorsque le ratio vitesse / viscosité a de trop grandes valeurs, il est retiré une masse continue de matière dans l'entre doigts. Le deuxième cas correspond au trempage à faible valeurs du couplage vitesse / viscosité qui permet dès les premiers instants de la remontée de

réaliser une fine épaisseur épousant la courbure. Le troisième cas est intermédiaire au deux précédents : à la sortie du bain, l'entre doigts est constitué d'une masse de matière continue qui se sépare vite en deux. Nous allons étudier ici les mécanismes des deux derniers cas qui permettent d'obtenir une forme finale du type de la *Figure 5-26*.

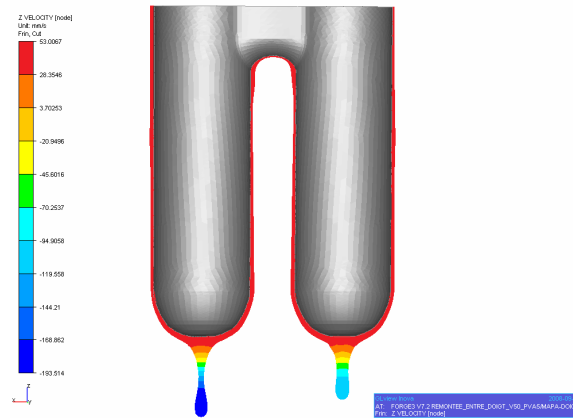


Figure 5-26 : Forme finale de l'épaisseur autour du moule à deux doigts dans le cas du PVA à une vitesse de retrait de 50mm/s et à une hauteur de 150 mm

5.5.1.3.1 Cas intermédiaire : mécanisme de séparation

Ce premier cas est obtenu pour une vitesse de remontée faible et une viscosité importante (cas du miel à 1 mm/s) ou encore pour une viscosité plus petite et une vitesse de remontée importante (cas du PVA à 50 mm/s).

Nous avons regardé en détails le cas du PVA à une vitesse de 50 mm/s que nous présentons *Figure 5-27*. Après émergence du moule, il y a séparation de la matière en deux dans l'entre doigts et ainsi les épaisseurs viennent épouser parfaitement la géométrie curviligne. Les différentes étapes de ce processus sont :

- Au départ, *Figure 5-27 a/*, la matière forme une masse constante s'écoulant par un filament de fluide reliant le moule au bain et qui s'est formé au cours de la remontée.
- A partir d'une hauteur de retrait de 95 mm (*Figure 5-27 b/*), au niveau de la formation du filament entre les doigts, il apparaît une zone à très forte vitesse selon $+z$ (115 mm/s). C'est à partir de ce phénomène que l'amas de matière est drainé dans l'entre doigts vers le contour des doigts pour ensuite venir coller parfaitement à la forme du moule. Dans les cas de plus grandes viscosité et / ou vitesse, la « palme » est trop large pour permettre toute séparation dans l'entre doigts.

— Comme le montre la *Figure 5-27 c/*, la zone à forte vitesse est hétérogène selon $+z$ et sépare ainsi la matière en deux, qui sous l'effet de la tension de surface, vient épouser la forme du moule. La forme finale obtenue est donnée *Figure 5-26*.

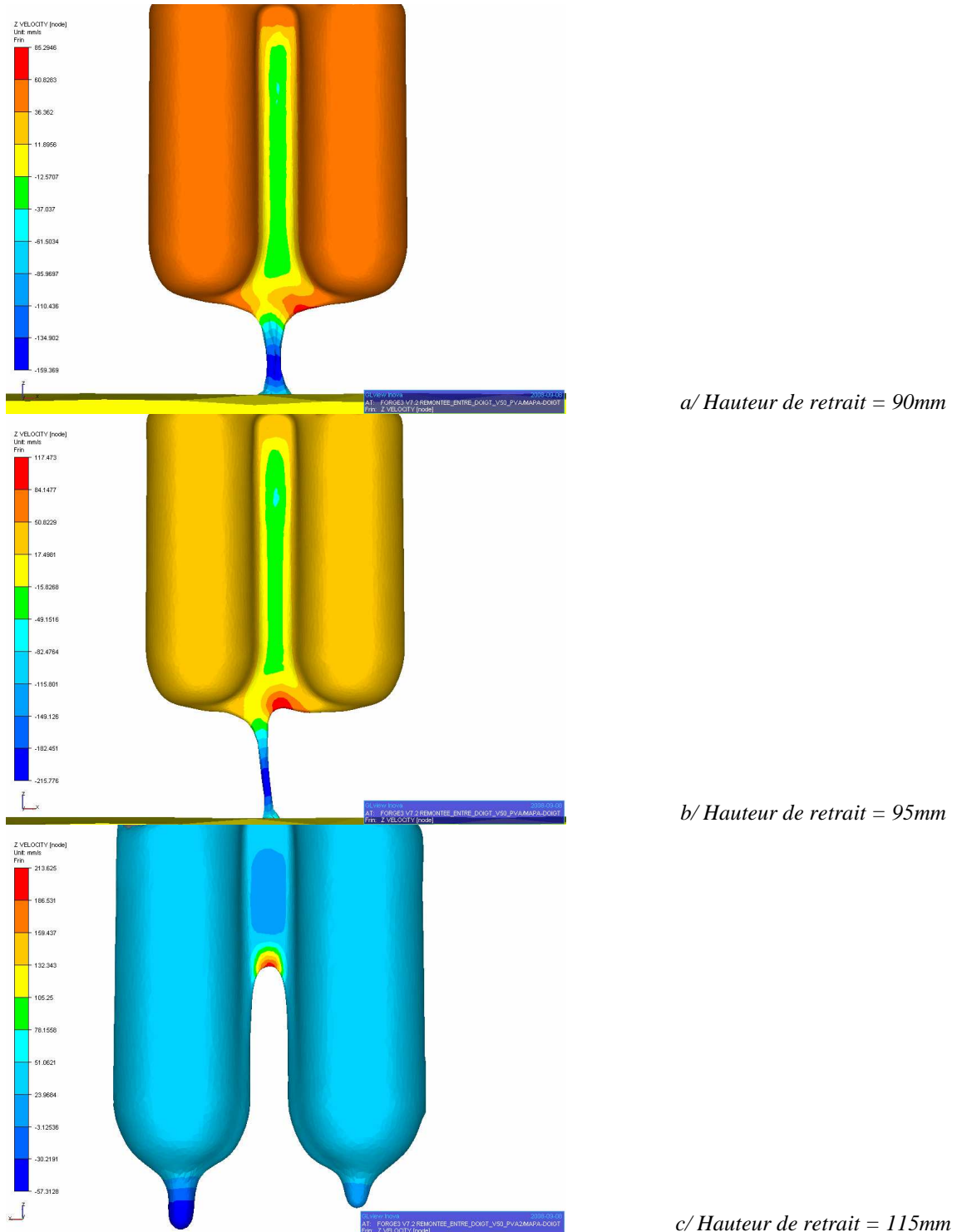


Figure 5-27 : Répartition du champ de vitesse dans l'entre doigts au cours de la remontée : mise en évidence du phénomène de détachement de la matière dans cette zone

5.5.1.3.2 Ratio à faibles valeurs de viscosité / vitesse

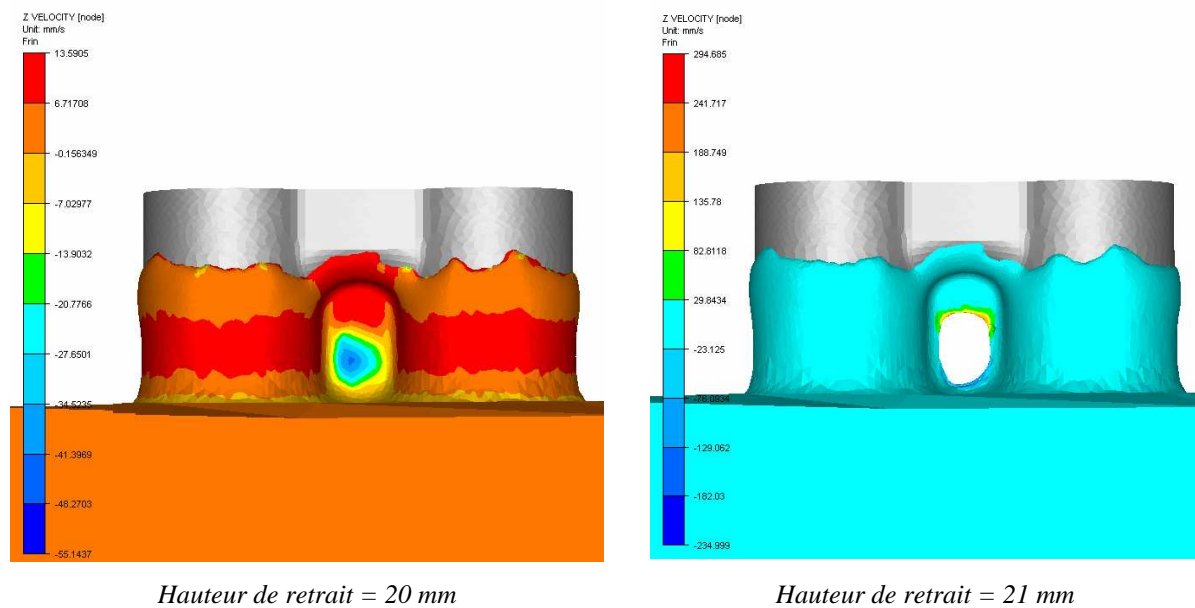


Figure 5-28 : Comportement de la matière dans l'entre doigts au cours de la remontée (PVA à 10 mm/s)

Pour de faible viscosité et de faible vitesse de remontée (cas du PVA à 10 mm/s), la séparation de la matière dans l'entre doigts se fait dès les premiers instants de la remontée comme cela peut se voir sur la *Figure 5-28*. Comme ces deux paramètres physiques sont faibles, le champ de vitesse dans l'entre doigts devient très petit (*Figure 5-28 a/*) ce qui conduit à une épaisseur de la masse de matière continue faible. Il y a rapidement rupture de cette membrane formée dans l'entre doigts (*Figure 5-28 b/*) et la matière vient ensuite épouser la forme de la courbure.

5.5.1.4 Critère permettant d'obtenir une épaisseur convenable dans l'entre doigts

A partir des différentes observations du comportement du fluide dans l'entre doigts, il est possible d'établir un diagramme résumant l'ensemble des informations recueillies et donnant les conditions du ratio vitesse de retrait / viscosité permettant d'obtenir des doigts non palmés.

Sur la *Figure 5-29*, nous avons tracé une droite approximative délimitant les cas de ratio vitesse / viscosité permettant d'obtenir des entre doigts épousant parfaitement le moule et ceux conduisant à une « palme ».

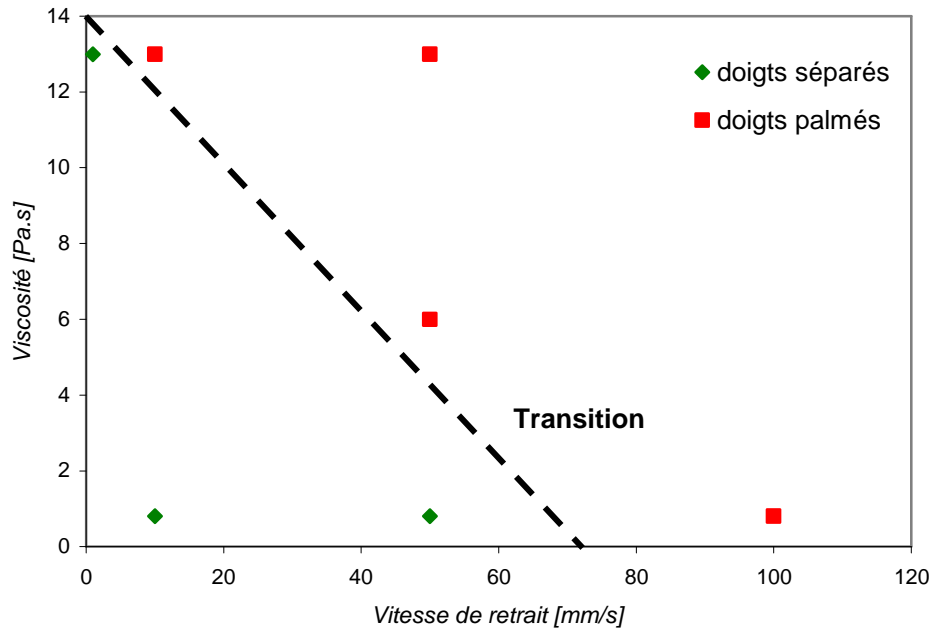


Figure 5-29 : Diagramme présentant l'influence du ratio vitesse de retrait / viscosité sur le comportement du fluide de l'entre doigts

5.5.1.5 Epaisseur dans l'entre doigts

Nous allons voir à présent comment se répartit l'épaisseur du film dans l'entre doigts. En plus de l'importance des paramètres viscosité et vitesse de retrait, sous l'effet de la gravité, de la tension de surface et de la courbure, elle n'est pas répartie régulièrement tout autour du moule.

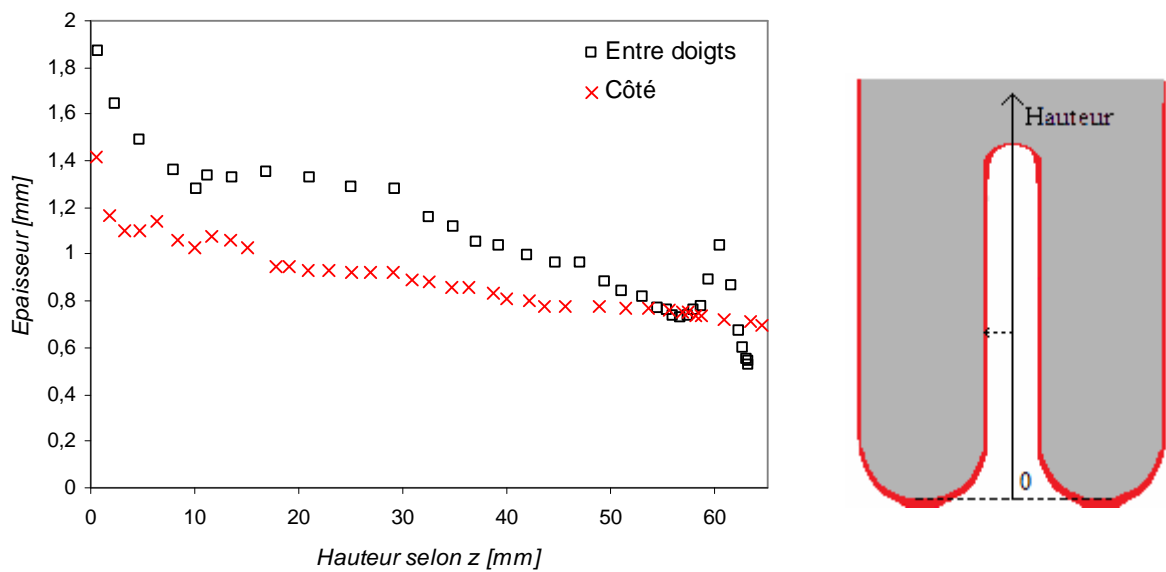


Figure 5-30 : Répartition de l'épaisseur autour du moule à deux doigts

Pour le cas du PVA à 50 mm/s (*Figure 5-30*), l'épaisseur dans la région de l'entre doigts est plus importante que dans les régions sur les côtés du moule. Le fluide est donc moins drainé dans l'entre doigts qu'autour du reste du moule.

La comparaison entre le cas du PVA à 10mm/s et à 50mm/ montre bien que la vitesse de retrait a une influence sur l'épaisseur extraite comme le montre la *Figure 5-31*. Plus la vitesse est faible, plus l'épaisseur dans l'entre doigts est petite.

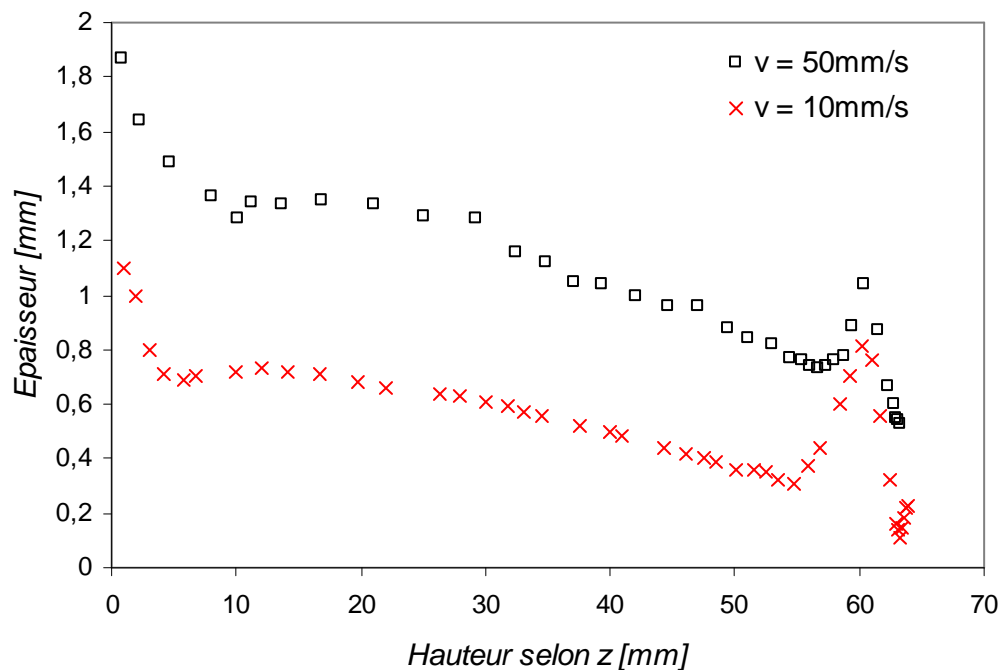


Figure 5-31 : Comparaison des épaisseurs dans l'entre doigts pour le PVA à différentes vitesses

D'autre part, sur les *Figure 5-30* et *Figure 5-31*, nous constatons que la courbure dans l'entre doigts a une grande influence sur l'épaisseur extraite. Nous avons déjà remarqué *Chapitre 4* que sur la partie hémisphérique inférieure du moule, l'épaisseur avait tendance à diminuer malgré la présence de la gravité. Ce phénomène s'accroît à plus grande tension de surface. Cette influence de la courbure sur l'épaisseur est retrouvée dans la partie supérieure de l'entre doigts. La courbure y est inversé par rapport à l'extrémité inférieure du moule, la tendance est donc différente : l'épaisseur augmente dans cette zone. En fait, la tension de surface y implique une dépression (*Figure 5-32*). Plus on se situe loin de la zone à forte courbure, plus la pression est grande : La pression P_1 dans le haut de la courbure est négative et à mesure que l'on se rapproche de la région à forte courbure, la pression diminue pour atteindre la valeur de P_2 . Ce phénomène conduit à une augmentation locale de l'épaisseur. Dans le reste de l'épaisseur, sous l'effet de la gravité, la pression augmente et atteint la valeur de P_3 .

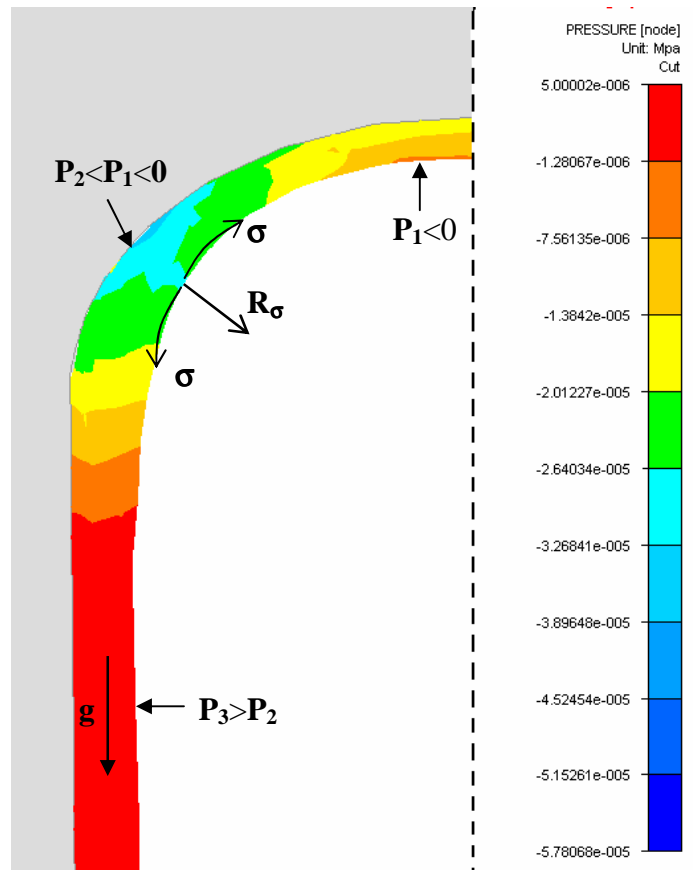


Figure 5-32 : Répartition de la pression P_i ($i=1, 2$ ou 3 selon le lieu) dans la courbure de l'entre doigts où σ est la force de tension de surface et R_σ sa résultante

5.5.2 Cas d'un implant mammaire

La remontée du moule de l'implant mammaire se fait selon deux mouvements qui se succèdent : tout d'abord, il y a une remontée verticale du moule suivie par une rotation de 90° (Figure 5-33).

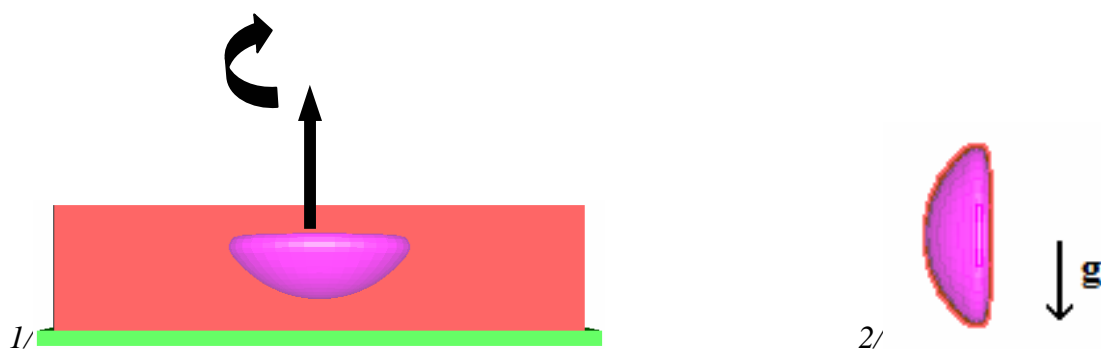


Figure 5-33 : Mouvement réalisé par le moule d'implant axisymétrique 1/ Remontée verticale suivie d'une rotation pour atteindre 2/ position fixe pour écouler le fluide le long du moule

Les épaisseurs sont mesurées de la manière présentée *Figure 5-34*. Nous distinguerons trois régions où les pentes du moule sont différentes et donc où les forces de tension de surface, la gravité et la viscosité jouent un rôle différent.

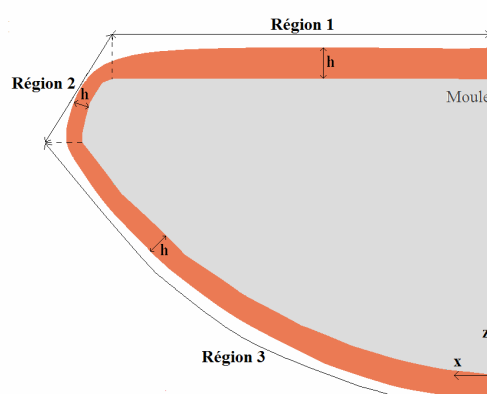


Figure 5-34 : Mesures des épaisseurs autour u moule

5.5.2.1 Remontée verticale

La remontée s'est faite à une vitesse de 10mm/s jusqu'à une hauteur de 100mm. Selon la région étudiée, les contraintes dans l'épaisseur varient. La *Figure 5-35* représente la répartition des contraintes de von Mises dans cette épaisseur pendant l'étape de retrait à une hauteur de 60mm. Les différences observées entre les différentes régions ont pour conséquence une répartition irrégulière de l'épaisseur autour du moule.

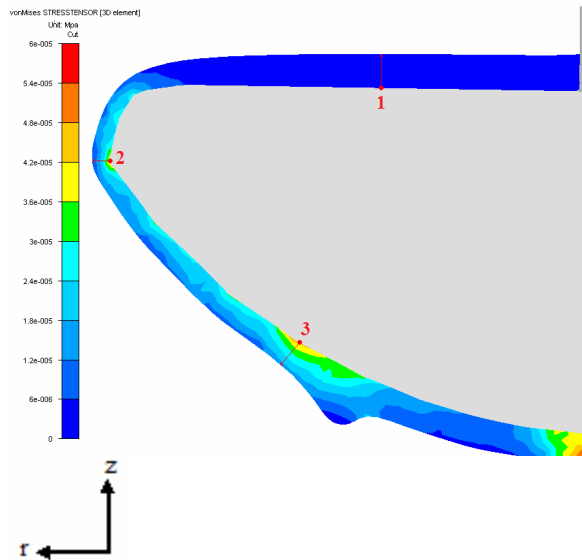
- Dans la région 1, l'épaisseur moyenne est de 3,34 mm. Selon x , l'épaisseur y diminue partant d'une épaisseur de 4,09 mm pour $x = 0$ mm à une épaisseur de 1,84 mm pour $x = 47,3$ mm. La courbure de la région 2 est à l'origine de cette diminution d'épaisseur car lorsque l'on s'en rapproche, les forces gravitationnelles ainsi que les forces de tension de surface y deviennent plus importantes.

La contrainte de von Mises y est faible et relativement constante (*Figure 5-35 b/*) du fait de la géométrie de cette région qui est celle d'un plateau horizontal.

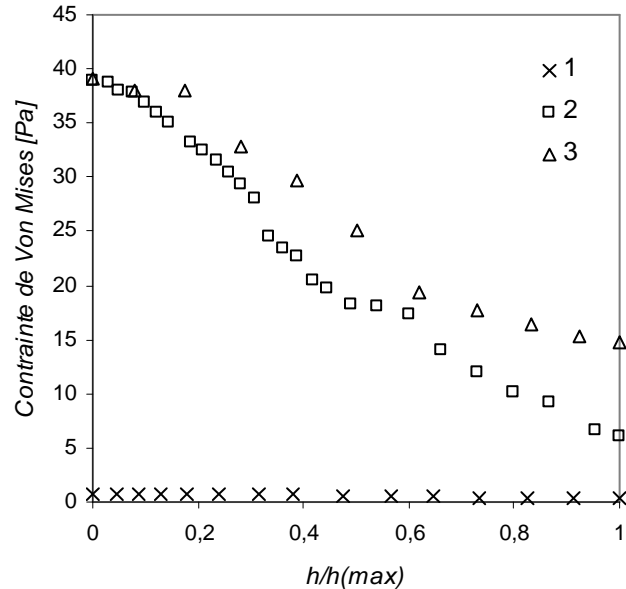
- La région 2 est une zone où la courbure est importante : la tension de surface y est donc prépondérante ainsi que la gravité. C'est dans cette zone que l'épaisseur est la plus faible : 1,19 mm en moyenne.

Dans l'épaisseur, lorsque l'on s'éloigne du moule (selon 2 *Figure 5-35 a/*), la contrainte de von Mises diminue relativement régulièrement (*Figure 5-35 b/*).

– La région 3 présente une courbure plus faible que précédemment. Malgré une contrainte de von Mises légèrement supérieure à celle de la région 2, l'épaisseur moyenne y est plus importante (2,55 mm) car la gravité y joue un rôle plus important.



a/ Champ de contrainte dans l'épaisseur à $t = 10s$



b/ Contraintes en fonction de l'épaisseur ramenée à un nombre adimensionnel pour trois endroits différents autour du moule

Figure 5-35 : Répartition des contraintes de Von Mises dans l'épaisseur

La répartition du champ de vitesse dans l'épaisseur est donnée sur la *Figure 5-36* :

– Dans la région 1, le champ de vitesse est constant. Cette zone est peu soumise aux forces gravitationnelles et de tension de surface, c'est pourquoi aussi bien le champ de vitesse que les contraintes de von Mises évoluent de manière constante.

– Dans la région 2, le champ de vitesse décroît linéairement.

– Dans la région 3, le champ de vitesse diminue dans un premier temps puis re-augmente pour atteindre la même valeur sur la surface libre qu'à l'interface moule / fluide. Cette évolution peut trouver son origine dans la compétition tension de surface / gravité.

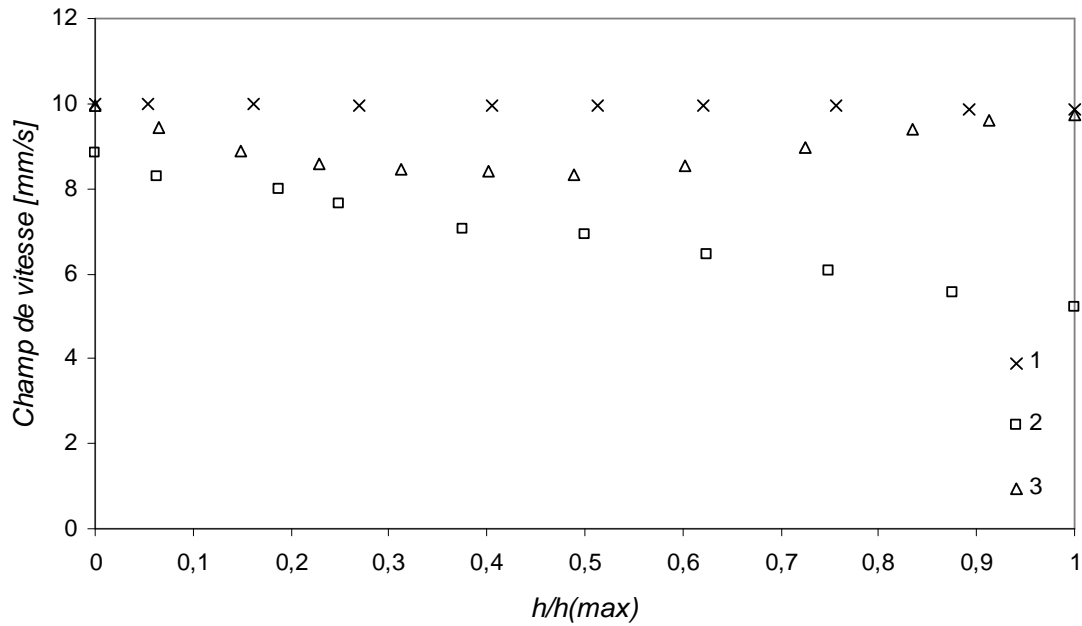


Figure 5-36 : Répartition du champ de vitesse en fonction de l'épaisseur h avec h_{\max} l'épaisseur totale à l'endroit de la mesure

5.5.2.2 Rotation

Le mouvement de rotation qui s'opère industriellement est très rapide. Après une rotation de 90° à une vitesse de 40 tr/min, l'épaisseur extraite autour du moule n'a quasiment pas varié par rapport à celle mesurée avant rotation comme cela peut se voir sur la Figure 5-37. Le mouvement de rotation se faisant rapidement, la répartition avant et après de l'épaisseur autour du moule reste la même : l'étape de rotation peut donc être négligée.

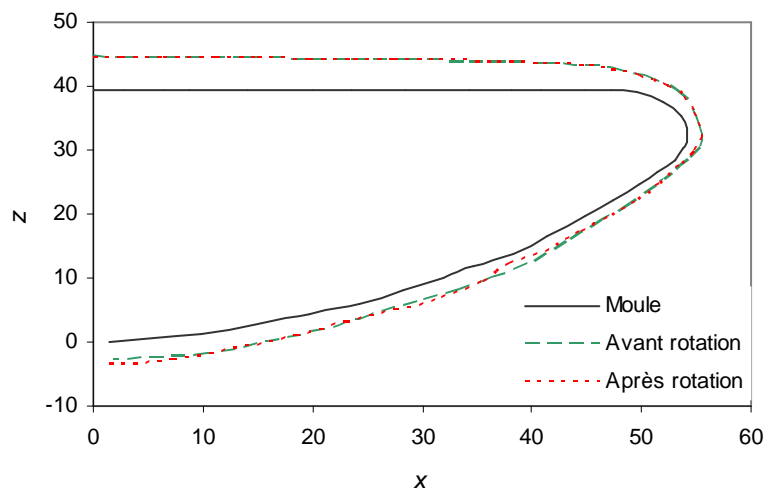


Figure 5-37 : Forme de l'épaisseur selon (x,z) sur un demi moule avant et après rotation

Le moule est ensuite laissé pendant près d'une heure dans la même position « verticale » pour que le fluide s'écoule. Tous les quarts d'heure, il est tourné de 90° selon son axe de symétrie pour permettre un écoulement régulier de l'ensemble de l'épaisseur.

Cette étape est difficile à mettre en œuvre numériquement car les pertes de matières sont très grandes et les épaisseurs obtenues très fines. Pour modéliser de tels cas, il faut travailler avec des tailles de mailles beaucoup plus petites que celles employées jusqu'à présent, ce qui n'est pas réalisable actuellement. En effet, numériquement nous avons trouvé des épaisseurs comprises entre 1,19 et 3,34mm, soit une masse de matière retenue autour du moule de 410g environ. Industriellement, il est obtenu au final une épaisseur comprise entre 0,34 et 0,54mm, soit une masse de matière retenue de 68g environ. La différence de masse entre avant écoulement et après est donc de 342g soit une perte de 83,4%. C'est donc durant cette étape que va se déterminer l'épaisseur finale extraite autour du moule contrairement au cas du trempage des gants où cette étape est inexistante et juste répartition de la matière tout autour du moule.

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'influence de paramètres physiques tels que la vitesse de retrait, la tension de surface, la viscosité et la forme du moule sur les épaisseurs extraites au cours du trempage.

La tension de surface est la force venant s'opposer à la gravité : elle permet de réduire les pertes de matières lorsque la viscosité est faible. Par contre pour de forte viscosité, elle est négligeable. D'autre part, nous avons montré que plus la viscosité du bain est faible, plus les épaisseurs retirées sont petites et plus la vitesse de remontée est grande, plus elles sont importantes.

Nous avons également examiné des cas avec des formes de moules complexes : le cas de l'entre doigts et celui de l'implant mammaire axisymétrique. Nous avons pu mesurer les épaisseurs dans ces deux cas mais les problèmes de temps de calcul (15 jours pour un cas) rendent difficiles l'exploration complète de ces deux cas tests.
