

**INFLUENCES DE PARAMETRES PHYSIQUES ET  
GEOMETRIQUES – ETUDES DE CAS ISOTHERMES**

## **5. INFLUENCES DE PARAMETRES PHYSIQUES ET GEOMETRIQUES – ETUDES DE CAS ISOTHERMES**

<b>5.1</b>	<b>Influence de la viscosité du bain.....</b>	<b>151</b>
5.1.1	Importance de la rhéologie sur la forme du ménisque .....	151
5.1.2	Importance de la viscosité après retrait complet du moule .....	152
5.1.2.1	<i>Influence de la viscosité sur l'épaisseur .....</i>	<i>152</i>
5.1.2.2	<i>Influence de la viscosité sur la masse retirée autour du moule .....</i>	<i>155</i>
5.1.2.3	<i>Influence de la viscosité sur la hauteur de rupture du filament.....</i>	<i>156</i>
<b>5.2</b>	<b>Influence de la vitesse de remontée.....</b>	<b>158</b>
5.2.1	Influence de la vitesse de remontée sur les épaisseurs extraites .....	158
5.2.2	Influence de la vitesse de retrait sur la masse retirée autour du moule .....	159
5.2.3	Influence de la vitesse sur la rupture du fil .....	160
<b>5.3</b>	<b>Influence de la tension de surface .....</b>	<b>161</b>
5.3.1	Influence de la tension de surface sur l'épaisseur extraite .....	161
5.3.1.1	<i>Variation de la taille de l'épaisseur en fonction de la tension de surface .</i>	<i>161</i>
5.3.1.2	<i>Variation de la masse de l'épaisseur en fonction de la tension de surface.....</i>	<i>163</i>
5.3.2	Influence de la tension de surface sur la rupture du fil .....	165
5.3.3	Compétition gravité – tension de surface .....	167
5.3.3.1	<i>Observations numériques .....</i>	<i>167</i>
5.3.3.2	<i>Observations expérimentales .....</i>	<i>168</i>
5.3.4	Amélioration de l'aspect de la surface .....	169
<b>5.4</b>	<b>Généralisation de l'influence des divers facteurs physiques .....</b>	<b>171</b>
5.4.1	Masse extraite autour du moule .....	171
5.4.2	Rupture du filament.....	172
	Influences des paramètres physiques et géométriques – Etudes de cas isothermes	149

<b>5.5</b>	<b>Cas de trempage de moules à formes complexes .....</b>	<b>173</b>
5.5.1	Cas du trempage d'un entre doigts .....	173
5.5.1.1	<i>Géométrie du moule employé et difficultés</i> .....	173
5.5.1.2	<i>Influence des paramètres physiques</i> .....	174
5.5.1.2.1	Influence de la viscosité .....	174
5.5.1.2.2	Influence de la vitesse .....	176
5.5.1.3	<i>Forme de la matière dans l'entre doigts</i> .....	176
5.5.1.3.1	Cas intermédiaire : mécanisme de séparation .....	177
5.5.1.3.2	Ratio à faibles valeurs de viscosité / vitesse.....	179
5.5.1.4	<i>Critère permettant d'obtenir une épaisseur convenable dans l'entre doigts</i> .....	179
5.5.1.5	<i>Épaisseur dans l'entre doigts</i> .....	180
5.5.2	Cas d'un implant mammaire .....	182
5.5.2.1	<i>Remontée verticale</i> .....	183
5.5.2.2	<i>Rotation</i> .....	185

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'étudier numériquement l'influence sur le procédé de trempage de certains paramètres physiques majeurs tels que la tension de surface, la viscosité, la vitesse de retrait ou encore la géométrie du moule. Cette partie a pour objectif de donner également les limites actuelles de l'utilisation de notre modèle pour la modélisation du processus de revêtement par trempage.

Les deux premiers paragraphes seront consacrés à l'observation du rôle de la viscosité ainsi que celui de la vitesse de retrait sur l'épaisseur extraite au cours du trempage. Ensuite, nous étudierons l'influence des forces de tension de surface. Les trois premiers paragraphes porteront sur l'étude du trempage d'un moule cylindrique selon les critères donnés dans le *Chapitre 4*. La dernière partie sera consacrée à des cas de trempages à formes géométriques complexes : les cas de l'entre doigts - zone critique durant le trempage des gants - et de l'implant axisymétrique seront examinés.

## 5.1 Influence de la viscosité du bain

Dans ce premier paragraphe, nous allons nous intéresser à l'influence de la viscosité newtonienne sur la forme de la surface libre, aussi bien au niveau du ménisque qu'après retrait complet du moule. Comme nous l'avons déjà vu expérimentalement dans le *Chapitre 3*, la viscosité est un facteur clé dans la détermination de l'épaisseur extraite. Dans les cas des fluides traités ici, dans la gamme des taux de cisaillement induits par le trempage ( $\dot{\gamma} = 1 - 10 \text{ s}^{-1}$ ), nous nous plaçons au niveau du plateau newtonien.

Nous nous intéresserons ici au cas d'un fluide newtonien de tension de surface  $\sigma = 25,8 \text{ mN/m}$  et de densité  $d = 0,95$ . La vitesse de retrait est de 10 mm/s, ce choix a été fait car elle est ni trop lente (vitesse lente = long temps de calcul) et ni trop rapide (pour se rapprocher des cas industriels).

### 5.1.1 Importance de la rhéologie sur la forme du ménisque

Bien avant d'influencer l'épaisseur finale extraite autour du moule, la viscosité joue déjà un rôle sur la forme du ménisque. Selon Spiers [Spiers73], les forces de tension de surface, de pression et la viscosité sont les trois principales forces déterminant la forme du ménisque. Plus précisément, l'épaisseur  $y$  est fonction de :

- La viscosité et la tension de surface dans le ménisque dynamique,
- La tension de surface et les forces de pression dans le ménisque statique.

Comme le montre la *Figure 5-1*, la viscosité a une réelle influence sur la forme du ménisque : à faible viscosité, sa courbure est d'autant plus importante que la viscosité est faible. Cette forme laisse déjà supposer que l'épaisseur après retrait sera plus faible pour des fluides moins visqueux.

La simulation numérique retranscrit donc bien l'importance des forces visqueuses dans la détermination de l'épaisseur dans le ménisque.

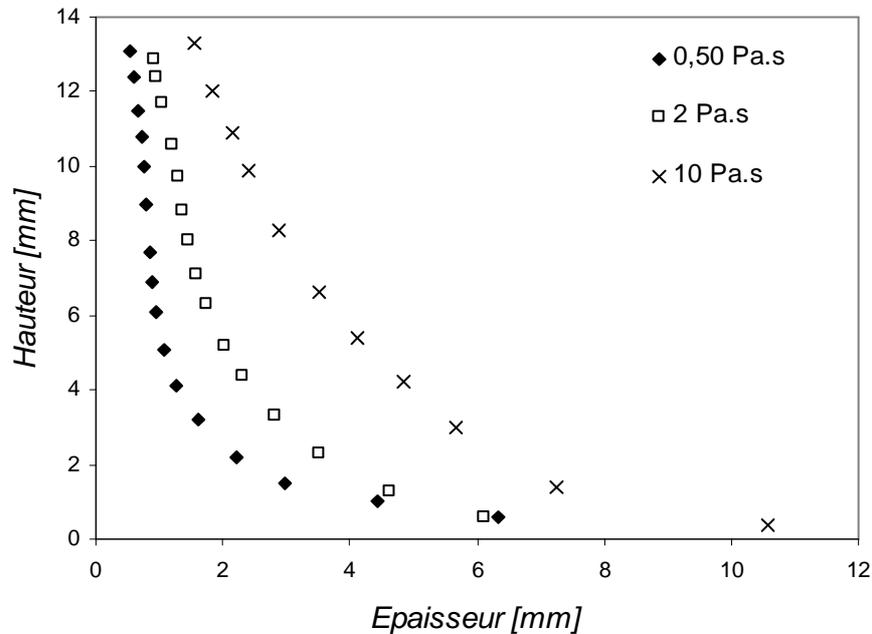


Figure 5-1 : Evolution de la forme du ménisque en fonction de la viscosité newtonienne

## 5.1.2 Importance de la viscosité après retrait complet du moule

### 5.1.2.1 *Influence de la viscosité sur l'épaisseur*

La *Figure 5-2* présente l'évolution des épaisseurs extraites autour du moule pour différentes viscosités. Plus cette dernière est forte, plus l'épaisseur extraite est importante. Nous retrouvons bien numériquement les mêmes tendances que nous avons observées expérimentalement, c'est-à-dire qu'une plus grande viscosité conduit à une plus grande épaisseur.

La hauteur maximale de la couche extraite est plus basse pour de plus petite viscosité, ceci est en fait lié à des instabilités numériques. Nous avons présenté dans le *Chapitre 4* l'origine de ce type d'observations dues au remaillage dans la région I. Nous retrouvons ce même phénomène ici à faible viscosité. Alors que le moule a été plongé à une profondeur de 33 mm, la hauteur moyenne de la couche extraite pour une viscosité inférieure ou égale à 2 Pa.s est plus basse (31,5 mm pour  $\mu = 2 Pa.s$  et 27,5 mm pour  $\mu = 0,5 Pa.s$ ). Il n'y a pas eu de perte

de matière mais celle-ci est venue s'agglutiner dans les épaisseurs inférieures ce qui explique l'augmentation soudaine d'épaisseur dans la région I.

Il est possible de corriger les conséquences liées à ce phénomène de perte de hauteur en considérant que la masse de matière extraite est correcte. Nous savons également que la surface libre dans la région I suit une forme parabolique ([Jeffreys30]).

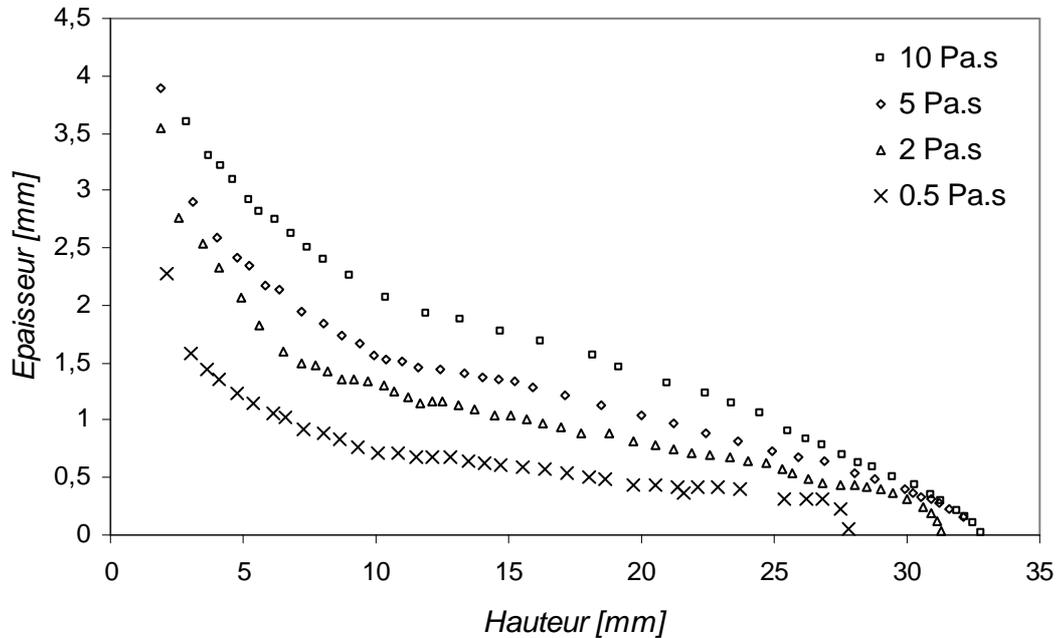
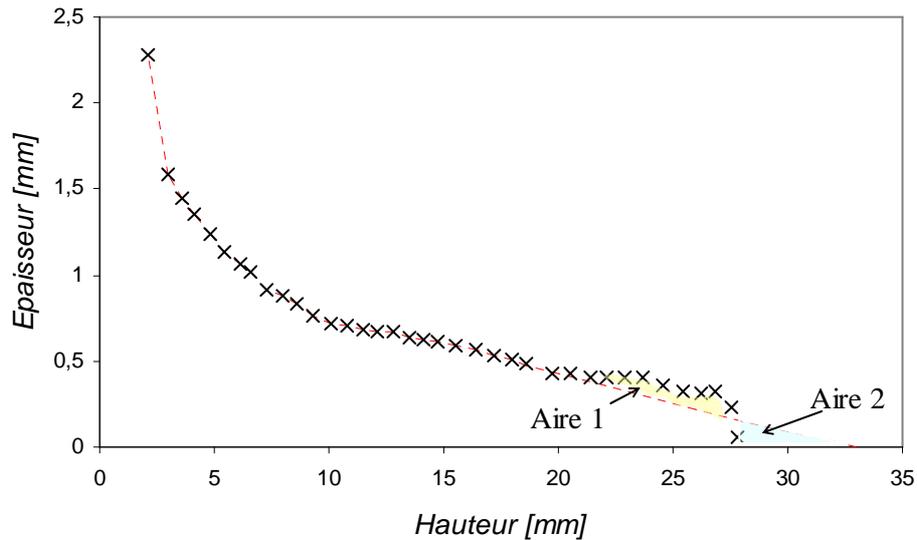


Figure 5-2 : Influence de la viscosité sur l'épaisseur dans un cas newtonien

A l'aide de ces deux postulats, il est possible de gommer les erreurs liées aux instabilités numériques et de reconstruire les formes des épaisseurs dans la région I. La courbe doit être redessinée de telle manière que l'épaisseur dans la région I soit de la forme d'une parabole ayant pour origine la hauteur réelle de trempage. Il faut également conserver la même masse de matière autour du moule. Pour cela, il faut respecter l'égalité des aires sous courbes comme cela est expliquée Figure 5-3 : l'Aire 1 doit être équivalente à l'Aire 2.

Le principe pour redessiner la forme de la surface libre consiste donc à résoudre le système suivant :

$$\text{pour } (h, z) \in \text{région I} \quad \begin{cases} \text{Aire}_{\text{corrigée}} = \text{Aire}_{\text{numérique}} \\ h = a \cdot z^2 + b \cdot z + c \quad a, b, c \text{ constantes} \\ h(z = 33\text{mm}) = 0 \end{cases}$$



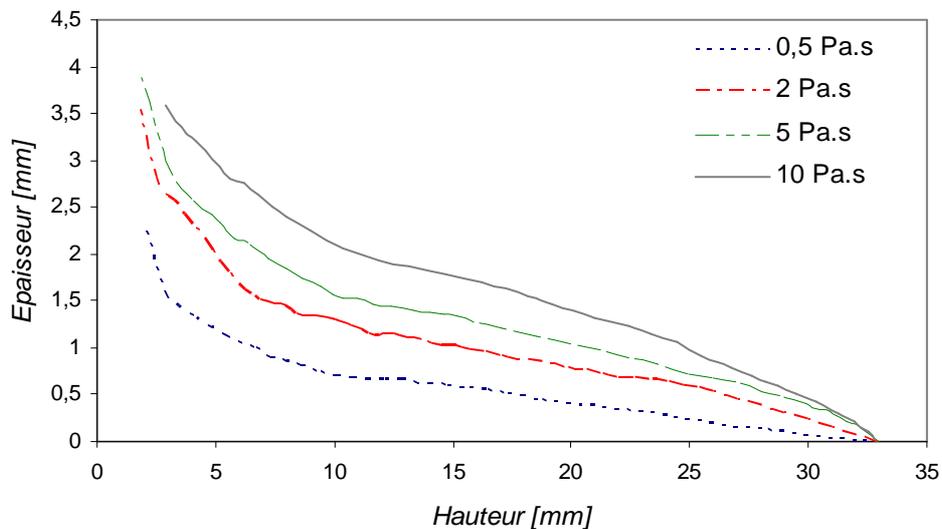
**Figure 5-3 : Extrapolation de la répartition de l'épaisseur pour une viscosité de 0,5 Pa.s pour corriger les erreurs numériques**

Les deux cas à corriger sont ceux aux plus faibles viscosités : à 0,5 Pa.s et à 2 Pa.s. Les valeurs des constantes a, b et c ainsi que les aires sont données dans le *Tableau 5-1*.

	a	b	c	Aire <sub>numérique</sub>	Aire <sub>corrigée</sub>
$\mu = 0,5 \text{ Pa.s}$	0,0002	-0,044	1,23	12,0	12,1
$\mu = 2 \text{ Pa.s}$	-0,001	-0,020	1,73	16,3	16,8

**Tableau 5-1 : Données permettant la reconstruction de la région I des courbes à faibles viscosités**

Après correction, les courbes donnant l'épaisseur en fonction de la hauteur sur le moule avec une viscosité différente sont données *Figure 5-4*.



**Figure 5-4 : Evolution de l'épaisseur en fonction de la viscosité après correction**

### 5.1.2.2 Influence de la viscosité sur la masse retirée autour du moule

Comme l'épaisseur est dépendante de la viscosité, la masse de fluide extraite autour du moule doit varier également. Le calcul s'est fait en déterminant les aires sous les courbes de la *Figure 5-2* à l'aide de la méthode des trapèzes. La masse peut ensuite être calculée connaissance les masses volumiques du fluide.

Comme le démontre la *Figure 5-5*, l'évolution de la masse extraite augmente logarithmiquement en fonction de la viscosité selon l'équation suivante :

$$m = 3,32 \ln(\mu) + 8,45 \quad \text{Eq. 5-1}$$

avec  $m$  la masse retirée autour du moule et  $\mu$  la viscosité.

La généralisation de cette équation donne l'expression suivante :

$$m = A \ln(\mu) + B \quad \text{Eq. 5-2}$$

avec  $A$  et  $B$  des constantes dépendantes de la masse volumique du fluide, de sa tension de surface et de la vitesse de retrait.

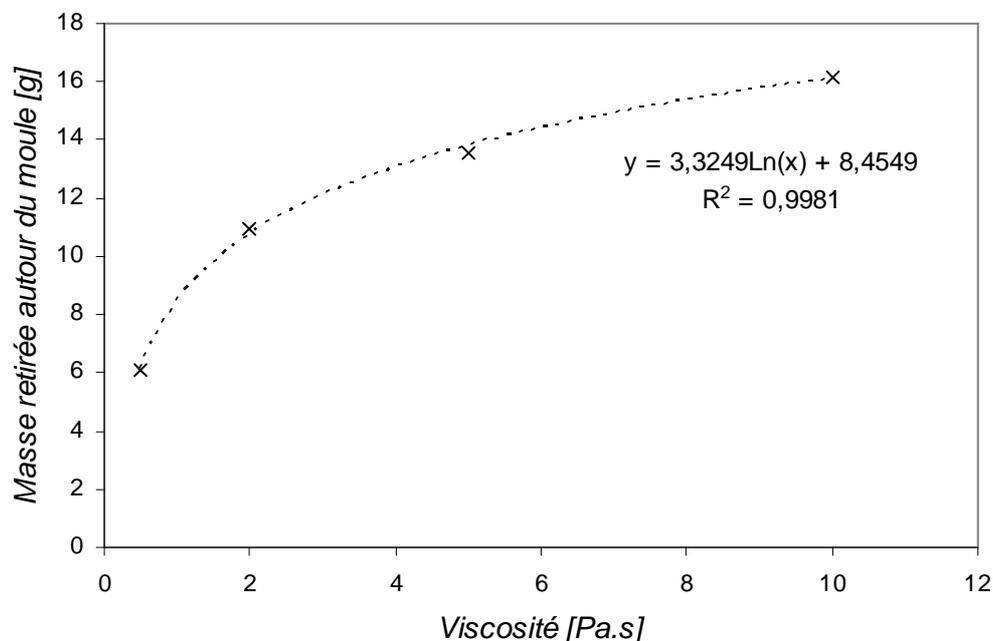


Figure 5-5 : Graphique présentant la relation entre la masse retirée autour du moule et la viscosité pour un fluide newtonien de masse volumique  $950 \text{ kg/m}^3$ , de tension de surface  $25,8 \text{ mN/m}$  et de à une vitesse de retrait de  $10 \text{ mm/s}$

### 5.1.2.3 Influence de la viscosité sur la hauteur de rupture du filament

Nous avons regardé l'influence de la tension de surface sur la rupture du filament dans le cas d'un fluide newtonien de tension de surface 60 mN/m, de densité 1,4 et à une vitesse de remontée de 10 mm/s. Selon une série d'expériences menée par Yasuda *et al.* [Yasuda04] présentée dans le *Chapitre 1*, la hauteur de rupture du fil est liée à la vitesse de retrait selon l'équation suivante :

$$H_r = C\mu U_0 + H_r' \quad \text{Eq. 5-3}$$

où  $C$  est un coefficient proportionnel en  $\text{Pa}^{-1}$  et  $H_r'$  la hauteur initiale de rupture quand  $U_0 = 0 \text{ m/s}$ .

Expérimentalement, la rupture du filament peut être due à divers facteurs prévisibles ou non. Une instabilité, une petite hétérogénéité de la composition du fluide, une poussière dans l'air peuvent en être à l'origine lors de l'élongation du filament due à la remontée du moule. Numériquement, le caractère aléatoire du milieu extérieur n'intervient pas mais la rupture se produit lorsque le diamètre du filament devient extrêmement petit (inférieur à la taille de maille) sous l'effet de la vitesse de remontée.

Il est donc intéressant de voir comment le processus de rupture du fil s'effectue numériquement. Sur la *Figure 5-6* est donnée la hauteur à laquelle elle se déroule en fonction de la vitesse de retrait. On constate que l'on retrouve bien la linéarité décrite par l'équation 5-3.

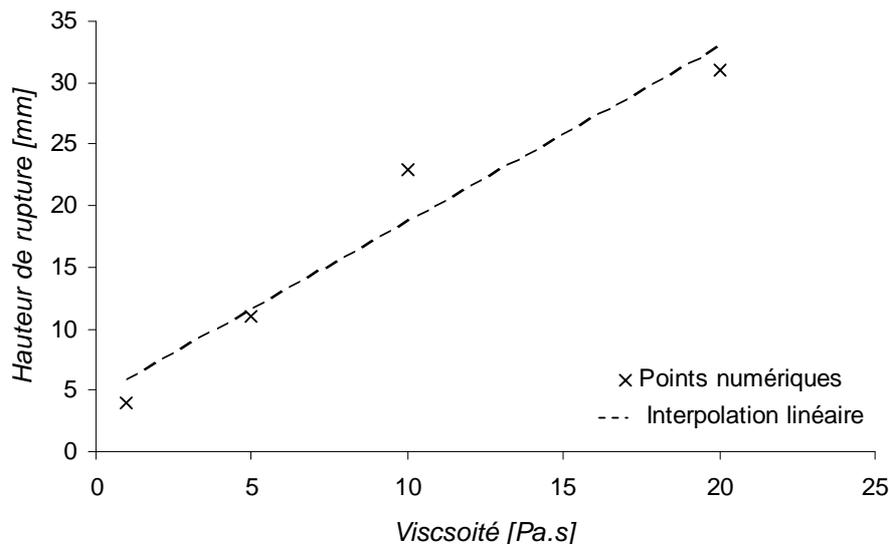


Figure 5-6 : Evolution de la hauteur de rupture du filament en fonction de la viscosité pour un fluide newtonien de masse volumique  $1400\text{kg/m}^3$ , à une vitesse de remontée de  $10\text{mm/s}$  et de tension de surface  $60\text{mN/m}$

La relation numérale trouvée est la suivante :

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

Yasuda *et al.* ont également relié le temps  $t_r$  auquel se déroulait la rupture en fonction de la viscosité selon l'équation 5-5 :

$$t_r = \frac{H_r}{U_0} = C\mu + \frac{H_r'}{U_0} \quad \text{Eq. 5-5}$$

$$\text{soit } t_r = 0,44 + 0,14\mu = \frac{4,4}{U_0} + 0,14\mu \quad \text{Eq. 5-6}$$

La rupture du filament créé à la sortie du moule hors du bain au cours de la modélisation numérique suit bien les tendances établies expérimentalement.

Alors qu'expérimentalement la rupture se produit lorsque le diamètre du filament atteint une valeur critique, là où toute instabilité conduit à la rupture, numériquement le phénomène conduisant à cette même rupture fait appel à un mécanisme semblable. La rupture du filament y apparaît lorsque le diamètre devient inférieur à la taille de maille minimum. C'est pourquoi les observations faites lors des modélisation du trempage donnent les mêmes tendances qu'expérimentalement.

## 5.2 Influence de la vitesse de remontée

Dans ce paragraphe, nous présentons l'étude de l'influence de la vitesse de retrait sur le procédé de trempage. Nous nous intéresserons dans un premier temps à son rôle sur l'épaisseur extraite. Nous regarderons ensuite l'évolution en fonction de la vitesse de remontée de la rupture du filament créé après retrait complet du moule. Le cas du fluide traité ici est le miel :  $\sigma = 60mN / m$  et de densité  $d = 1,4$ .

### 5.2.1 Influence de la vitesse de remontée sur les épaisseurs extraites

Nous avons vu expérimentalement que dans les cas du miel et du PVA, les épaisseurs extraites à 5, 7 et 10 mm/s étaient presque identiques et il avait été alors supposée qu'au delà d'une certaine vitesse de retrait, ici 5 mm/s, l'épaisseur extraite était la même. Cette tendance n'est pas retrouvée numériquement comme le montre la *Figure 5-7* : plus la vitesse est rapide, plus l'épaisseur est grande.

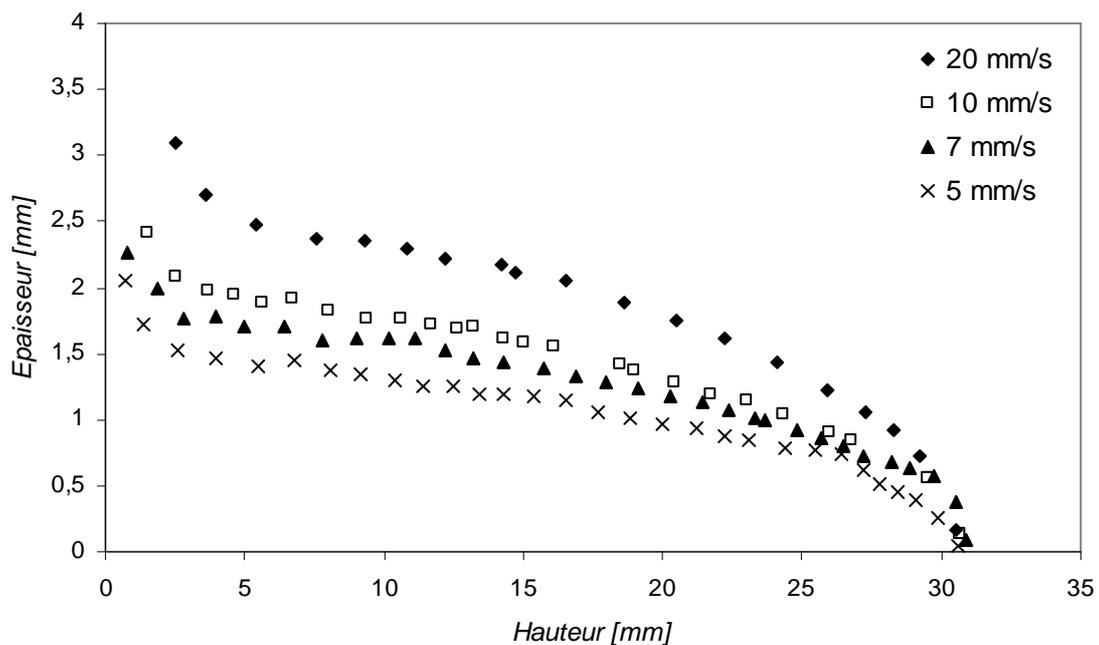


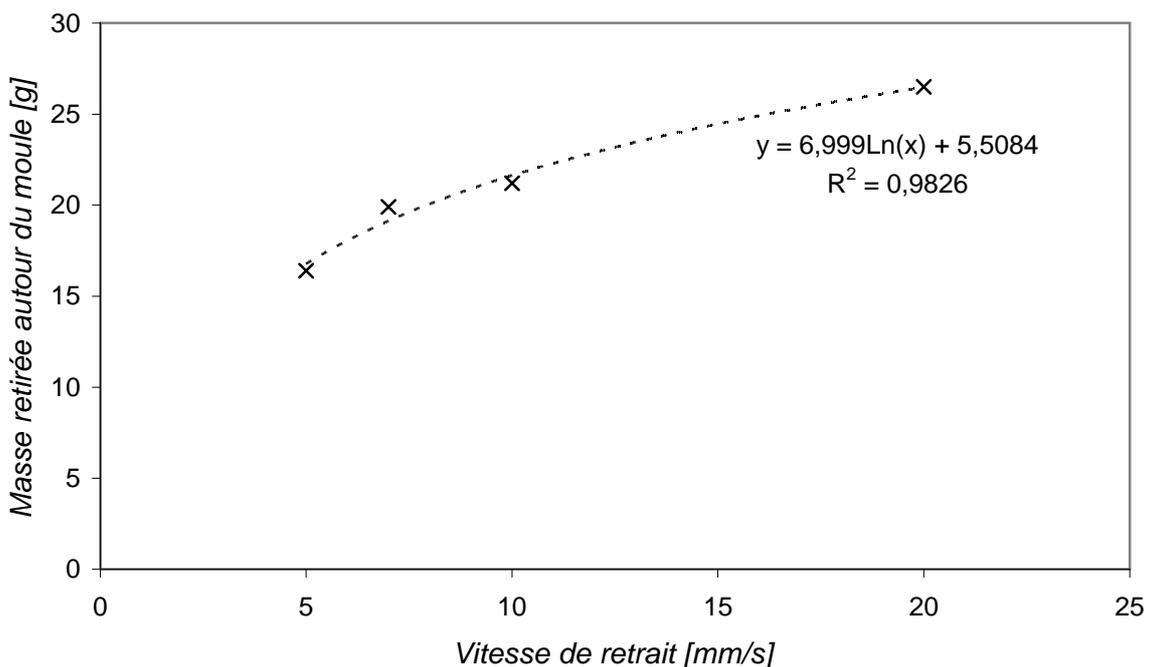
Figure 5-7 : Evolution de l'épaisseur en fonction de la vitesse de remontée dans le cas du miel

Les raisons des différences observées entre expérimentation et modélisation ont pour principale origine les erreurs liées aux mesures expérimentales. En plus de celle liées au calcul de l'épaisseur sur les photographies viennent s'ajouter celles dues à une mauvaise maîtrise des vitesses de remontée sur le prototype de trempage (erreur estimée à 10%). La modélisation numérique permet évidemment une grande précision aussi bien au niveau des paramètres tels que la vitesse de retrait que sur la mesure des épaisseurs.

La tendance que nous donne la *Figure 5-7* semble donc correcte et elle est confirmée par l'épaisseur obtenue à une vitesse de 20 mm/s – non testée expérimentalement - nettement plus importante qu'à 10 mm/s

### 5.2.2 Influence de la vitesse de retrait sur la masse retirée autour du moule

Nous procédons à la même étude que nous avons faite dans le paragraphe 5.1.2.2, c'est-à-dire nous cherchons la variation de masse retirée en fonction de la vitesse de retrait du moule.



**Figure 5-8 : Graphique représentant la relation entre la masse retirée autour du moule et la vitesse de retrait pour un fluide newtonien de masse volumique 1400 kg/m<sup>3</sup>, de tension de surface 60 mN/m et de viscosité 13 Pa.s**

Selon la *Figure 5-8*, l'évolution de la masse extraite augmente logarithmiquement en fonction de la vitesse de retrait selon l'équation suivante :

$$m = 7,00 \ln(U_0) + 5,51 \quad \text{Eq. 5-7}$$

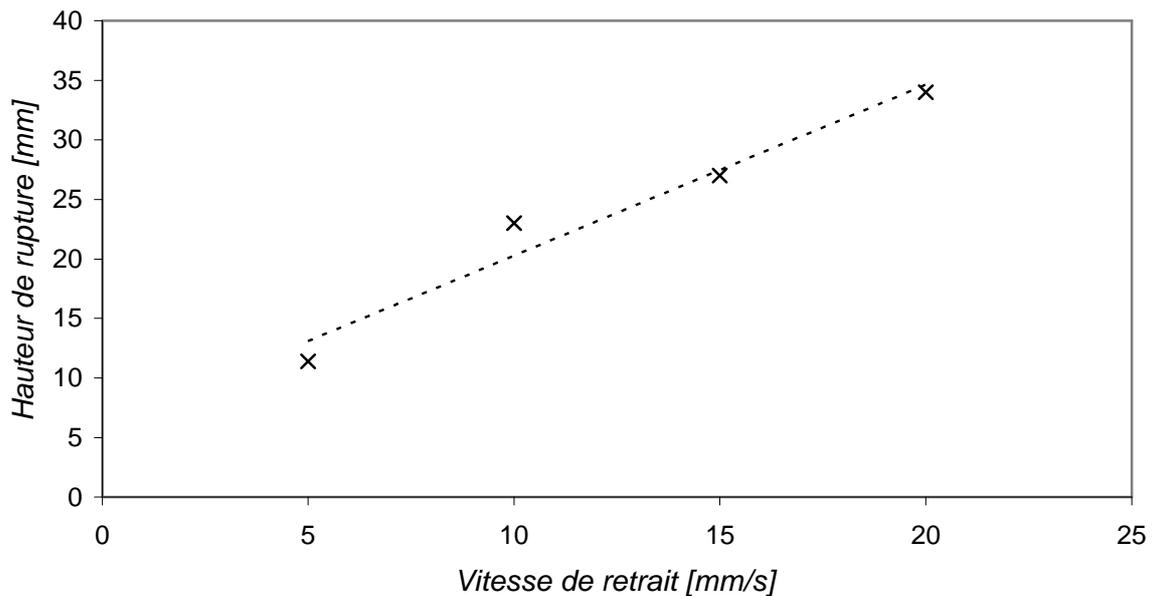
avec  $U_0$  la vitesse de retrait du moule.

Les paramètres  $A$  et  $B$  sont fonction de la masse volumique, de la tension de surface et la viscosité.

### 5.2.3 Influence de la vitesse sur la rupture du fil

Nous procédons de même que dans le paragraphe 5.1.2.3 pour déterminer l'influence de la vitesse de retrait sur la hauteur de rupture du filament.

Sur la *Figure 5-9* est donnée la hauteur à laquelle la rupture du filament s'effectue en fonction de la vitesse de retrait. On constate que l'on retrouve bien la linéarité décrite par Yasuda *et al.* [Yasuda04] dans l'équation 5-3.



**Figure 5-9 :** Evolution de la hauteur de rupture du filament en fonction de la vitesse de retrait pour un fluide newtonien de masse volumique  $1400 \text{ kg/m}^3$ , de tension de surface  $60 \text{ mN/m}$  et de viscosité  $10 \text{ Pa.s}$

La relation numérique trouvée dans ce cas est la suivante :

$$H_r = 1,39U_0 + 5,9 = 0,14\mu U_0 + 5,9 \quad \text{Eq. 5-8}$$

Il est également possible de relier le temps  $t_r$  auquel se déroule la rupture en fonction de la vitesse de retrait  $U_0$  selon l'équation 5-5 :

$$t_r = \frac{5,9}{U_0} + 1,4 = \frac{5,9}{U_0} + 0,14\mu \quad \text{Eq. 5-9}$$

Comme dans le cas où l'on avait regardé l'influence de la viscosité sur la rupture du filament, l'influence de la vitesse de retrait sur cette même rupture suit bien les tendances établies expérimentalement.