



ETUDE D'UNE TECHNIQUE DE CARACTÉRISATION D'UNE PÂTE VISCOÉLASTIQUE FONDÉE SUR SON ASPIRATION



Résumé :

Nous avons lu qu'étudier la dynamique d'aspiration d'un amas de cellules dans un capillaire permettait de renseigner sur le caractère cancéreux ou non de l'amas [1]. Nous avons aussi lu qu'un amas de cellules pouvait être considéré comme un fluide viscoélastique [1]. Nous avons voulu en savoir plus. Nous avons donc choisi un fluide viscoélastique du commerce, la silly putty. Nous avons tout d'abord vérifié que la silly putty était bien un fluide viscoélastique, et donc un bon candidat pour notre travail, puis nous avons donc essayé de l'aspirer dans un tube en plastique en nous inspirant de l'étude [7]. L'analyse de nos films nous a permis de calculer le module d'élasticité E et la viscosité dynamique η de la silly putty.

Mot-clés :

viscoélasticité, silly putty, étalement, aspiration, dynamique, amas de cellules cancéreuses.

– Encadré par Mme DEMEURE

– Lycée Robert Doisneau de Vaulx-en-Velin



Table des matières

1	Introduction et motivations	2
1.1	Motivations	2
1.2	Introduction	2
2	La silly putty : un fluide viscoélastique	4
2.1	Fluide viscoélastique : définition	4
2.2	Comportement de la silly putty : deux échelles de temps	4
2.2.1	Au temps court	4
2.2.2	Au temps long	5
3	Aspiration de la silly putty dans un capillaire	7
3.1	Démarche expérimentale	7
3.1.1	Dispositif expérimental	7
3.1.2	Traitement de la vidéo d'aspiration	8
3.2	Observations expérimentales	8
3.3	Modélisation de la silly putty	10
4	Conclusion et perspectives	12
	Références	13

Chapitre 1

Introduction et motivations

1.1 Motivations

En septembre 2018, c'est-à-dire au moment où notre groupe entrait en première S, Mme Demeure est venue nous présenter le concours des Olympiades de Physique. Au début, seulement deux d'entre nous étaient intéressés. En effet, nous avons tout d'abord pensé que cela nous prendrait trop de temps et que participer aux Olympiades ne serait pas très amusant. Finalement, après discussion entre nous, nous avons réussi à former une équipe de six, avec pour atouts majeurs une très bonne entente entre nous et un excellent esprit d'équipe. Nous étions alors prêts à relever le défi !

Avant de définir le sujet sur lequel porterait notre étude, nous avons choisi comme thème principal l'étude des cellules cancéreuses. Par la suite, et après avoir été un peu guidés par notre encadrante, nous avons décidé d'étudier une technique de caractérisation des cellules cancéreuses fondée sur leur aspiration. Afin d'en apprendre plus sur le sujet, nous avons lu quelques fragments de la thèse de Mélanie DURTH [1]. Cette lecture nous a guidés dans le choix des expériences que nous réaliserons par la suite. Il a alors fallu dresser la liste du matériel nécessaire à la mise en œuvre de ces expériences. Nous nous sommes vite rendu compte qu'il faudrait adapter les expériences en fonction du budget dont nous disposions, ce que nous avons fait. Cela a été long, mais nous y sommes finalement parvenu et avons pu démarrer sérieusement les expériences en mai 2019. Après la finale académique, nous sommes allés rencontrer Charlotte RIVIERE, chercheuse à l'Institut Lumière Matière de Lyon pour qu'elle nous aide à mieux comprendre le phénomène de propagation du cancer dans le corps humain. Nous tenons à la remercier.

1.2 Introduction

Des recherches menées contre le cancer ont prouvé qu'il existait un lien entre l'évolution de la maladie et celle des propriétés mécaniques des cellules. Une des particularités des cellules cancéreuses est que, contrairement aux cellules saines, elles sont déformables. Ceci leur procure la faculté de migrer à travers les vaisseaux du corps humains (comme représenté sur la figure 1.1) et c'est ainsi que se propage le cancer : on parle alors de formation de métastases [1].

Il est donc important de mettre en place des techniques qui permettent de sonder cette capacité à se déformer de la cellule. L'une de ces techniques consiste à aspirer la cellule dans un tube et à étudier la dynamique de cette aspiration. Pour les mêmes raisons, mais cette fois à plus grande échelle, il peut être intéressant d'aspirer un amas de cellules cancéreuses (tumeur). C'est cette expérience sur laquelle nous nous sommes concentrés, en modélisant la tumeur par une pâte viscoélastique appelée « silly putty ».

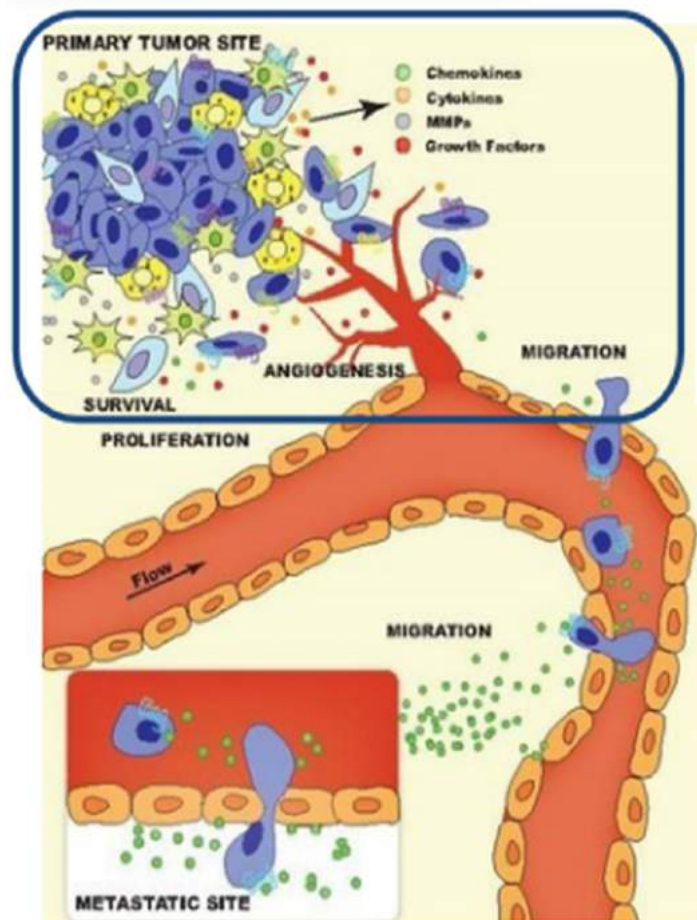


FIG. 1.1 – Déformation cellulaire et propagation du cancer [2].

Chapitre 2

La silly putty : un fluide viscoélastique

2.1 Fluide viscoélastique : définition

Un fluide viscoélastique est un fluide qui a un double visage [3] :

- il se comporte comme un solide élastique si on l’observe au temps court ; en effet, si on fait une balle avec un fluide viscoélastique et qu’on la lâche sur le sol, elle va rebondir comme une balle de tennis.
- il se comporte comme un liquide visqueux au temps long : si on dépose une balle d’un fluide viscoélastique sur la table, elle va s’étaler mais cela prend du temps.

Nous allons vérifier que la silly putty est bien un fluide viscoélastique.

2.2 Comportement de la silly putty : deux échelles de temps

2.2.1 Au temps court

Si l’on fait une balle avec un petit morceau de silly putty et qu’on la lâche au-dessus d’une table, elle rebondit. Nous avons voulu faire cette expérience et la filmer comme décrit sur la figure 2.1).

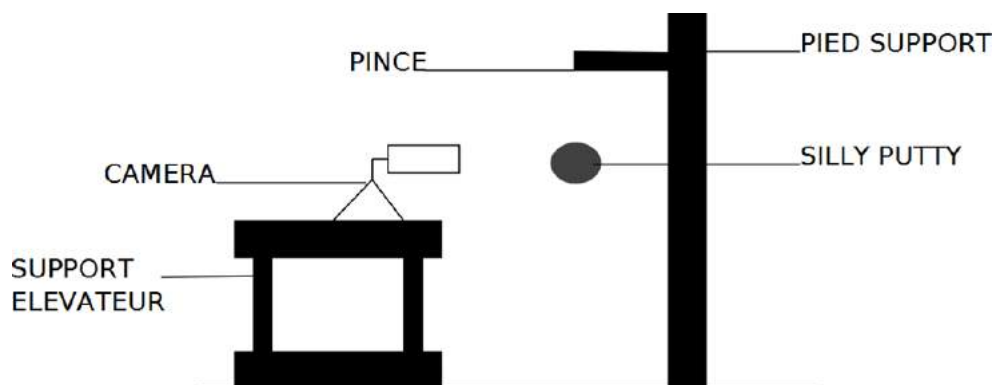


FIG. 2.1 – Montage expérimental pour filmer le rebond d’une petite balle de silly putty.

Pour cela, nous avons pris un morceau de silly putty que nous avons modelé pour en faire une balle de 1,5 cm de diamètre. Nous avons installé une webcam sur l’ordinateur et avons filmé le rebond de la silly putty. Finalement, nous n’avons pas pu exploiter le film pour étudier le rebond de la silly putty car notre

caméra n'était pas assez rapide (seulement 60 images/s) et seules des traînées floues étaient visibles sur la vidéo.

Nous vous le montrerons donc en direct.

2.2.2 Au temps long

Afin d'étudier le comportement de la silly putty au temps long, nous avons pris trois morceaux de silly putty de tailles différentes que nous avons modelé pour former des balles : une balle de 1,1 cm, une de 1,5 cm et une de 1,8 cm. Ces diamètres ont été mesurés grâce à une règle placée en arrière-plan. Ensuite, nous avons utilisé une webcam et avons filmé pendant environ une heure et demi (voir figure 2.2).

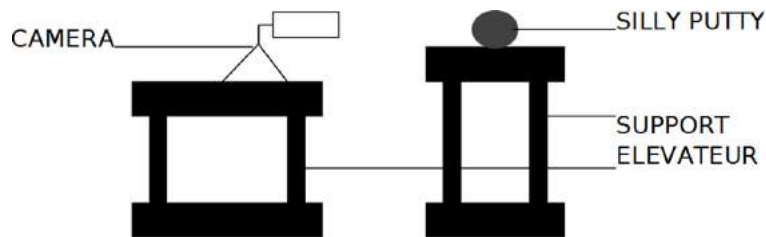


FIG. 2.2 – Montage expérimental pour filmer l'étalement de trois petites balles de silly putty.

Les cinq images que nous avons extraites du film et qui sont visibles sur la figure 2.3 montrent que les balles de silly putty s'étaient très lentement, comme le ferait un liquide très visqueux.

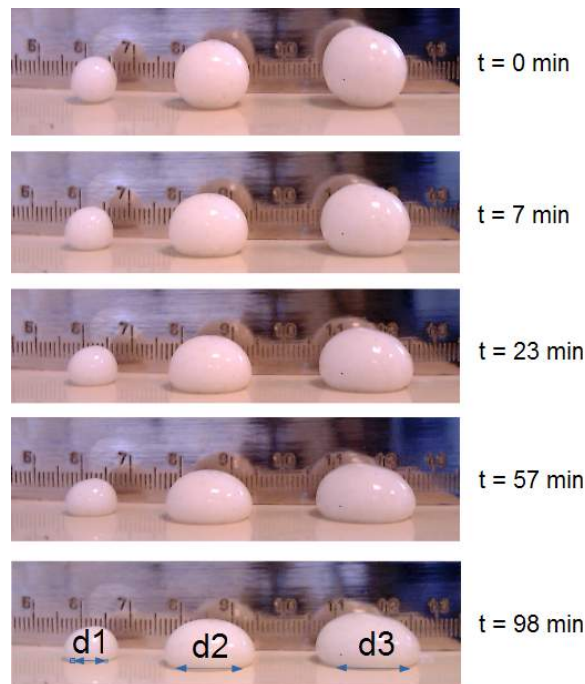


FIG. 2.3 – Evolution de la forme des balles de silly putty en fonction du temps.

Pour le visualiser plus facilement, nous avons tracé sur la figure 2.4 ci-dessous l'évolution du diamètre

du disque de contact entre la balle et le support de chacune des trois balles en fonction du temps.

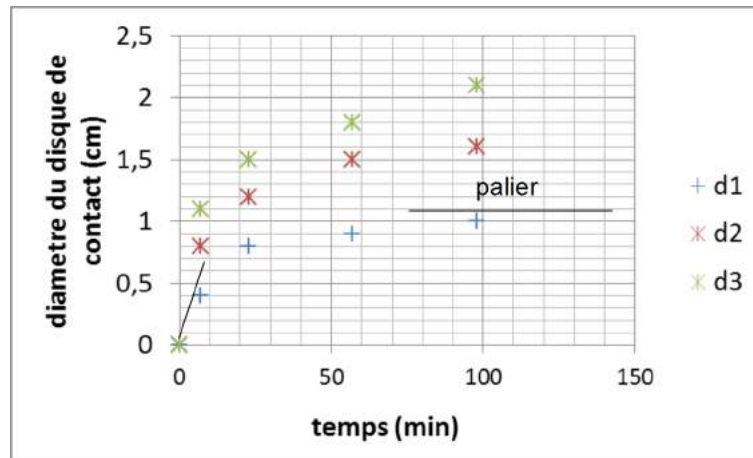


FIG. 2.4 – Evolution du diamètre du disque de contact entre la balle et le support pour chacune des trois balles en fonction du temps.

Les graphiques montrent que l'étalement de la silly putty est lent, qu'il n'est pas linéaire et qu'il ralentit au fur et à mesure du temps puisque la tangente à la courbe s'horizontalise de plus en plus jusqu'à atteindre un palier. La silly putty peut donc être considéré comme un liquide visqueux lorsqu'on l'observe sur un temps suffisamment long.

Finalement, la silly putty se comporte bien comme un solide élastique au temps court et comme un liquide visqueux au temps long

Chapitre 3

Aspiration de la silly putty dans un capillaire

3.1 Démarche expérimentale

3.1.1 Dispositif expérimental

Afin d'étudier l'aspiration d'une balle de silly putty, nous avons réalisé le montage décrit sur la figure 3.1.

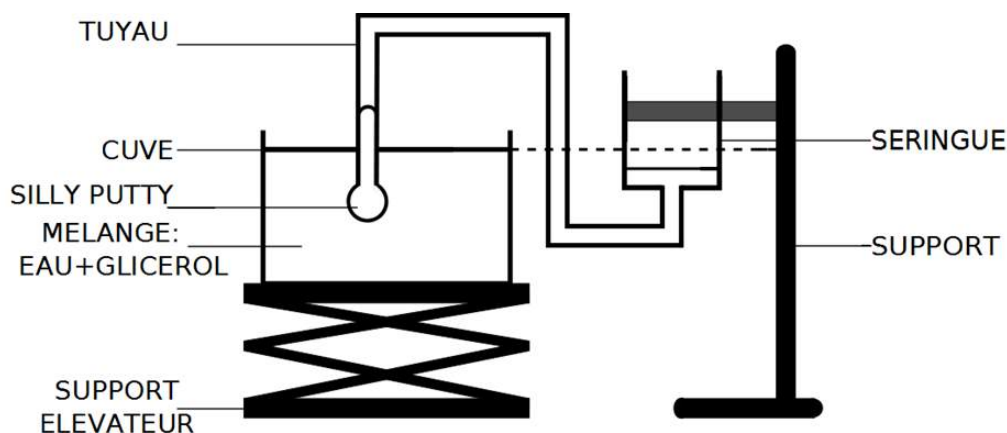


FIG. 3.1 – Montage expérimental permettant d'aspirer une balle de silly putty dans un capillaire.

Le mélange eau/glycérol ayant la même masse volumique que la silly putty, il permet de s'affranchir du poids de la balle lors de l'aspiration. Cependant, cela rend très difficile la réalisation de l'expérience alors nous avons supprimé la cuve remplie du mélange eau/glycérol et posé la balle directement sur le support élévateur. Le capillaire et la seringue ont ensuite été remplis d'eau et la sortie du tube capillaire a été alignée avec la surface libre de l'eau dans la seringue afin qu'il n'y ait aucun écoulement d'eau. La balle est alors mise au contact du tube capillaire à l'aide du support élévateur et la vidéo est lancée. Finalement la seringue est abaissée brutalement d'une dizaine de centimètres pour que la balle de silly putty soit aspirée dans le tube capillaire. L'aspiration est filmée pendant presque 7 h. Lorsque le film est terminé, il est rééchantillonné avec Virtualdub en ne gardant qu'1 image sur 400. En effet, comme nous ne connaissions pas *a priori* la vitesse du phénomène étudié, nous avons fait une vidéo à 60 images/s.

Nous avons donc plus d'un million d'images pour 7h d'enregistrement, ce qui était impossible à traiter. Nous nous sommes limités à une vingtaine d'images à traiter.

3.1.2 Traitement de la vidéo d'aspiration

Une fois le film rééchantillonné, nous l'avons ouvert avec le logiciel Aviméca et nous avons pointé la position du front de silly putty dans le capillaire (voir figure 3.2 ci-dessous).

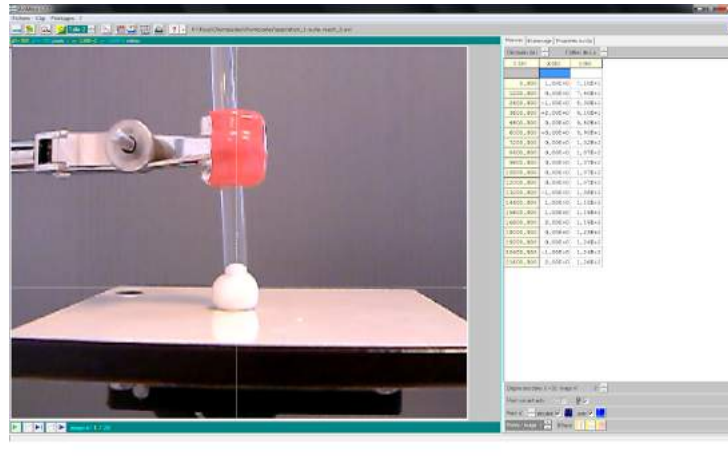


FIG. 3.2 – Pointage de la vidéo dans Aviméca.

Finalement, nous avons envoyé les valeurs de la position de la silly putty dans le tube en fonction du temps dans le logiciel Regressi et avons tracé le graphique correspondant (voir figure 3.3 ci-dessous).

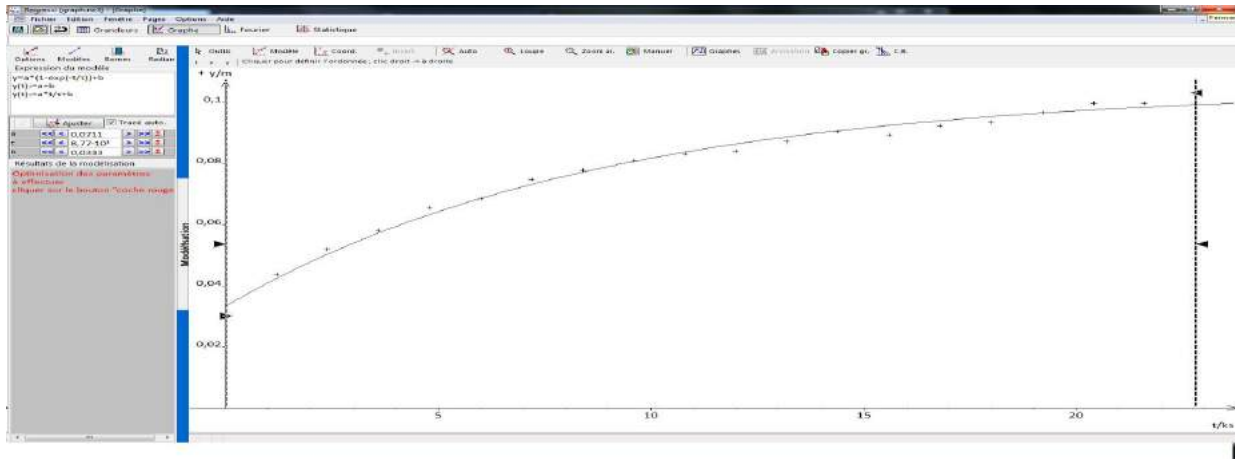


FIG. 3.3 – Tracé du graphique représentant la position de la silly putty dans le capillaire en fonction du temps.

3.2 Observations expérimentales

Cinq images ont été extraites d'une vidéo d'aspiration (voir figure 3.4 ci-après) pour laquelle l'abaissement de la seringue a été mesuré à 10 cm. Elles montrent que le front de la balle de silly putty est arrondi dans le capillaire et qu'il monte au fur et à mesure du temps.

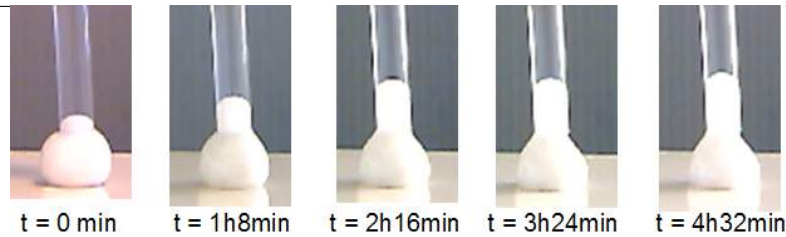


FIG. 3.4 – Montée de la silly putty dans le tube de diamètre intérieur $D = 0,50 \pm 0,04$ cm.

Afin d'avoir une idée de la vitesse à laquelle la balle monte dans le tube, nous avons tracé la position L du front de silly putty dans le tube en fonction du temps (voir figure 3.5 ci-dessous).

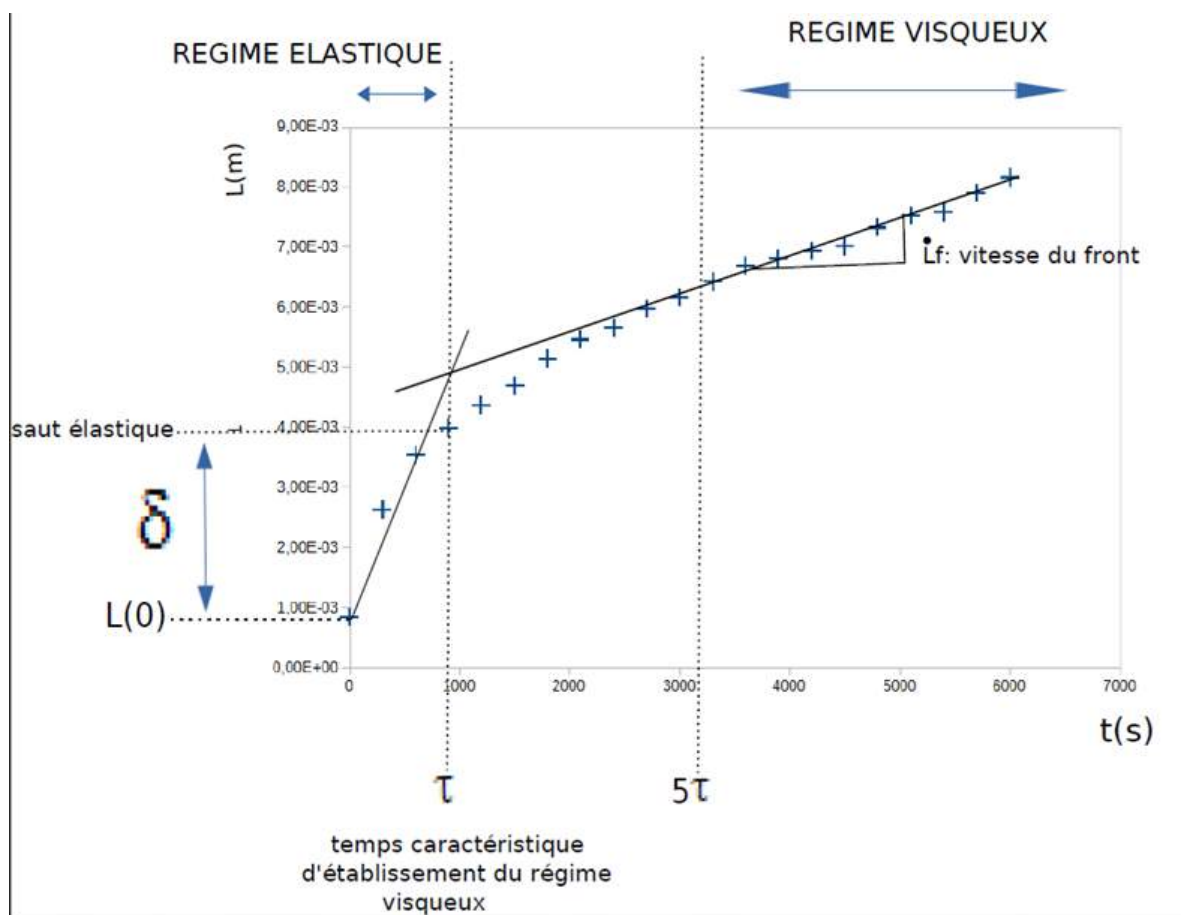


FIG. 3.5 – Position de la silly putty dans le capillaire en fonction du temps pour une pression d'aspiration de $\Delta h = 10$ cm soit $\Delta P = (9,8 \pm 0,1) \times 10^2$ Pa.

Sur ce graphe, on retrouve les deux comportements de la silly putty : aux temps courts, le régime élastique où le front de la silly putty s'arrondit rapidement et, aux temps longs, le régime visqueux où le front de la silly putty avance lentement dans le tube à vitesse constante. Le comportement de la silly putty est caractérisé par trois paramètres : τ , δ et \dot{L}_f . Le temps τ représente le temps caractéristique pour que le régime visqueux s'établisse ; δ représente le saut élastique, c'est-à-dire la déformation rapide du front de la silly putty au début de l'aspiration et \dot{L}_f est la vitesse finale du front dans le tube.

L'objectif de la partie suivante est d'utiliser ces trois paramètres afin de remonter au module d'Young E et à la viscosité dynamique η de la silly putty.

3.3 Modélisation de la silly putty

Pour faire coïncider ces deux régimes, on peut utiliser le modèle de fluide viscoélastique décrit sur la figure suivante (voir figure 3.6 ci-dessous) : un amortisseur (ξ_v) est mis en série avec un modèle de Kelvin-Voigt (κ, ξ_{el}). La silly putty est ici aspirée avec une force $f_a = \Delta P \times \pi \frac{D^2}{4}$ où $D = 0,50 \pm 0,04$ cm et $\Delta P = (9,8 \pm 0,1) \times 10^2$.

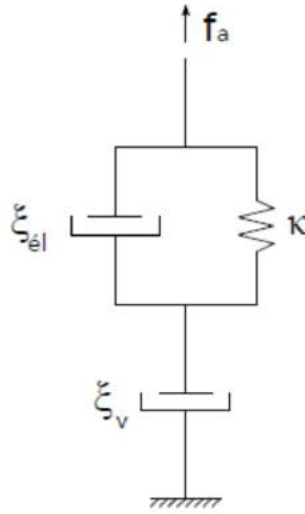


FIG. 3.6 – Modèle de fluide viscoélastique appliqué à la silly putty.

En résolvant une équation différentielle, ce qui n'est pas à notre niveau et c'est pour cela que nous ne le détaillons pas ici, on peut montrer que ce modèle permet d'obtenir l'expression suivante pour la position L du front de silly putty dans le tube en fonction du temps :

$$L(t) = L(0) + \frac{f_a}{\kappa} (1 - \exp(-\frac{\kappa t}{\xi_{el}})) + \frac{f_a}{\xi_v} t$$

La position peut aussi s'exprimer en fonction des trois paramètres τ , δ et \dot{L}_f de la manière suivante :

$$L(t) = L(0) + \frac{\delta - L(0) - \dot{L}_f \tau}{0,63} (1 - \exp(-\frac{t}{\tau})) + \dot{L}_f t$$

Aux temps courts, il a été montré par M. Aoki *et al* que, pour un tube ayant la même finesse que le nôtre, on a :

$$\frac{2\delta}{D} = \frac{\Delta P}{E} \quad [4]$$

D'après la figure 3.5, $\delta = 2,8$ mm. Ainsi :

$$E = \frac{\Delta P \times D}{2\delta} = \frac{980 \times 0,50 \times 10^{-2}}{2 \times 2,8 \times 10^{-3}} = 8,7 \times 10^2 \text{ Pa.}$$

L'incertitude majeure sur E provient de la mesure de D qui a été faite au pied à coulisse. On estime l'incertitude à $u(D) = 0,04$ cm. Ainsi $u(E) = \frac{u(D)}{D} \times E = 7 \times 10^1$ Pa.

Finalement le module d'élasticité de la silly putty est estimé à :

$$E = (8,7 \pm 0,7) \times 10^2 \text{ Pa.}$$

Aux temps longs, et tant que la silly putty n'est pas trop rentrée dans le tube, on fait l'hypothèse que la force d'aspiration f_a est compensée par la force de frottements visqueux $f_v = 3\pi^2\eta D/2L(t)$ [5], c'est-à-dire qu'on néglige le poids de la balle (car elle repose encore sur le support) et on néglige les frottements aux parois du tube. Dans ce cas, on obtient :

$$\dot{L}_f = \frac{D\Delta P}{6\pi\eta}$$

Soit :

$$\eta = \frac{D\Delta P}{6\pi\dot{L}_f}$$

Dans le cas de la figure 3.5, $\dot{L}_f = 7,3 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ soit $2,6 \text{ mm.h}^{-1}$.

Ainsi :

$$\eta = \frac{0,50 \times 10^{-2} \times 980}{6\pi \times 7,3 \times 10^{-7}} = 3,6 \times 10^5 \text{ Pa.s.}$$

L'incertitude majeure sur η provient, comme pour E , de la mesure de D . Ainsi $u(\eta) = \frac{u(D)}{D} \times \eta = 3 \times 10^4 \text{ Pa.s.}$

Finalement la viscosité dynamique de la silly putty est estimée à :

$$\eta = (3,6 \pm 0,3) \times 10^5 \text{ Pa.s.}$$

Ces valeurs de E et η paraissent être de bons ordres de grandeur si l'on en croit l'étude du Cambridge Polymer Group [6].

Chapitre 4

Conclusion et perspectives

Pour l'instant, nous avons réussi à mettre en évidence le caractère viscoélastique de la silly putty, faisant d'elle un bon candidat pour modéliser un amas de cellules cancéreuses [1]. Nous avons réalisé quelques films d'aspiration de balle de silly putty dans un capillaire. Ces films nous ont permis de remonter aux valeurs du module élastique et de la viscosité dynamique de la silly putty. On a trouvé :

$$E = (8,7 \pm 0,7) \times 10^2 \text{ Pa} \text{ et } \eta = (3,6 \pm 0,3) \times 10^5 \text{ Pa.s.}$$

Ces résultats semblent raisonnables aux vues de l'étude [6].

Nous aimerions faire d'autres films afin d'améliorer la reproductibilité de nos expériences.

D'autre part, il faudrait que nous puissions aspirer la balle lorsqu'elle baigne dans le mélange eau/glycérol afin de nous affranchir du poids et que la balle garde la même allure sphérique pendant la phase d'aspiration.

Enfin, il serait intéressant de voir l'impact de la hauteur d'abaissement de la seringue sur la dynamique d'aspiration de la balle, afin de voir si l'on retrouve les mêmes valeurs pour E et η .

Références

- [1] M. Durth, *Dynamiques d'aspirations d'interfaces complexes*, Thèse, Ecole Polytechnique X, 2012
- [2] O'Hayre *et al.*, *Cell assemblies evolution during cancer progression*, Biochem. J. 409, 2008
- [3] C. Verdier, *Cours de rhéologie*, LIPhy, Université Joseph Fourier de Grenoble
- [4] T. Aoki *et al.*, *The pipette aspiration applied to the local stiffness measurements of soft tissues*, Anals of Biomedical Engineering, 1997
- [5] Z. Dagan *et al.*, Journal of Fluid Mechanics;115 : 505, 1982.
- [6] Cambridge Polymer Group, Silly putty "Egg", Application note, 2010.
- [7] K. Guevorkian, M.-J. Colbert, M. Durth, S. Dufour et F. Brochard-Wyart, *Aspiration of biological viscoelastic drops*, 2010.