

Stage de fin de L3

François Soubiran

2006

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier chaleureusement Francesca Chilla de m'avoir permis d'effectuer ce stage que j'ai trouvé particulièrement intéressant. Je remercie également, Jean-Christophe Géminard de m'avoir accueilli si aimablement au sein de son équipe pendant deux mois. Je le remercie pour l'aide qu'il m'a apporté tout au long de mes recherches ainsi que pour son enthousiasme communicatif à l'égard de la recherche expérimentale. Par ailleurs, ce stage n'aurait pu être ce qu'il est sans le soutien, la patience et la détermination de Valérie Vidal qui m'a permis de passer un stage dans des conditions exceptionnelles et je l'en remercie. Enfin, je désire remercier mes compagnons de stage ainsi que tout le laboratoire de physique de l'ENS Lyon pour la bonne humeur qui régnait durant tout le stage. A vous tous, un grand merci !

Table des matières

Introduction	3
1 Le montage expérimental	4
1.1 Présentation	4
1.2 Etalonnage des instruments	4
1.2.1 Calibrage du débitmètre	4
1.2.2 Calibrage du capteur de pression	5
1.3 Détermination du volume de la chambre	6
1.4 Propriétés rhéologiques du fluide viscoélastique	6
1.4.1 Viscosimétrie	7
1.4.2 Mesures en oscillations	8
2 Etude des régimes d'écoulement de l'air à travers le fluide	9
2.1 Premières tentatives	9
2.2 Observation des régimes	9
2.2.1 Les régimes	9
2.2.2 Diagramme des régimes	10
2.2.3 Le régime bullaire	11
2.3 Fluide très concentré	12
3 Etude fréquentielle des phénomènes	14
3.1 Etude fréquentielle des pics dans les régimes "bulles" et "canal"	14
3.2 Etude fréquentielle du lâcher de bulles	15
3.3 De multiples fréquences	15
3.4 Etude de certaines résonances	16
3.4.1 Expérience	16
3.4.2 Résultats	17
Conclusion	19
Annexes	21

Introduction

Chaque année, le volcanisme actif de notre planète fait de nombreuses victimes. Pour essayer de diminuer les conséquences funestes des éruptions volcaniques il est nécessaire de comprendre comment elles se produisent et quels sont les mécanismes qui interviennent lors de ces événements. On observe différents types d'éruptions. Certains volcans, comme le Stromboli en Italie, développent des éruptions où la laves et les éléments pyroclastiques sont éjectés par bursts discrets et non de façon continue alors que d'autres, comme le Kilauae de Hawaï, offrent, eux, le spectacle de véritables fontaines de lave continues. On n'hésite encore dans les explications à donner de ces phénomènes. Pour certains, il s'agit d'une variation du débit de gaz volcanique qui pourraient être à l'origine de ces différences. Pour d'autres, il s'agit de propriétés rhéologiques différentes d'un magma à l'autre. Les physiciens essaient de créer en laboratoire des expériences permettant d'affirmer ou d'infirmer l'une ou l'autre des explications. Leur objectif est donc de découvrir quels liens existent entre la dynamique d'écoulement de gaz dans les milieux visqueux et les propriétés rhéologiques du fluide.

Les premières expériences remontent à une dizaine d'années et portent essentiellement sur des fluides newtoniens visqueux ou alors sur des fluides complexes mais uniquement dans le régime de bulles isolées (travaux de T. Divoux) alors que l'on observe également dans certaines conditions, des écoulements continus avec formation d'un canal ouvert au sein du fluide. Mon stage a consisté en l'étude des différents régimes d'écoulement d'air au travers d'un fluide complexe, que ce soit des bulles isolées ou des canaux ouverts, en imposant un flux d'air constant à l'origine. L'objectif est de mettre en avant l'influence de la rhéologie du milieu sur les comportements qu'il présente.

Chapitre 1

Le montage expérimental

1.1 Présentation

Dans le montage expérimental, on place un débitmètre sur l'arrivée d'air et on le relie à une chambre dont on peut faire varier le volume par insertion d'eau. Cette chambre est reliée au capteur de pression et à la cellule expérimentale. Celle-ci est un cylindre en plexiglas dont le fond est percé d'un trou de 2 mm de diamètre et d'où sort l'air. On remplit alors la cellule avec

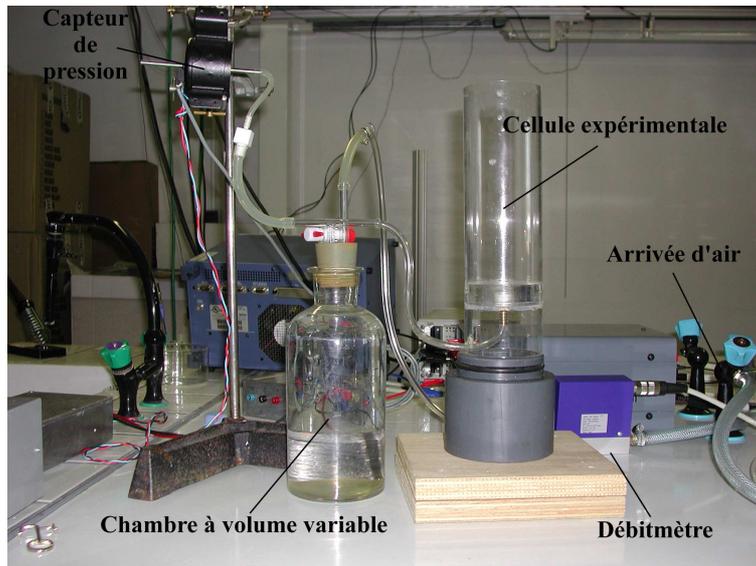


FIG. 1.1 – Photographie du montage expérimental

un fluide viscoélastique, et ce sur une certaine hauteur. Le but de l'expérience est d'étudier les différents régimes d'écoulement de l'air à travers ce fluide complexe, et en particulier la transition entre la remontée de bulles isolées et la mise en place d'un canal ouvert. Ces régimes vont dépendre étroitement des différents paramètres caractérisant le montage expérimental : le débit massique d'air D , le volume d'air V contenu dans la chambre, la hauteur h de fluide au sein de la cellule, la concentration c du fluide et le diamètre d de l'orifice d'arrivée d'air.

1.2 Etalonnage des instruments

1.2.1 Calibrage du débitmètre

Le débitmètre - modèle D-5111 de M+W Instruments - est un appareil qui permet de réguler le débit massique d'air dans le circuit en fonction d'une tension de commande. Le but

de l'étalonnage est de déterminer la loi reliant le débit massique D et la tension de contrôle U . Le principe de la mesure est le suivant : on prend une burette graduée remplie d'eau et renversée dans un cristalliseur contenant également de l'eau. On remplit alors la burette avec de l'air provenant du débitmètre. On commence la mesure à la première graduation et on remplit d'air la burette jusqu'à égalisation des niveaux d'eau. On a à t_0 un volume d'air V_0 à la pression p_0 et à la température T . Les paramètres à t_1 sont indicés par 1. Si on note h_e la hauteur de la colonne d'eau à t_0 , on a la relation

$$p_0 = p_{atm} - \rho g h_e$$

donc la masse d'air correspondante, dans l'hypothèse d'un gaz parfait, est

$$m_0 = \frac{MV_0}{RT}(p_{atm} - \rho g h_e)$$

De même, on obtient la masse d'air à t_1 par la relation

$$m_1 = \frac{MV_1 p_{atm}}{RT}$$

On peut donc en déduire le débit massique que l'on suppose constant entre t_0 et t_1 et on a :

$$D = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{M}{RT \Delta t} (p_{atm} \Delta V - \rho g h_e V_0) \quad (1.1)$$

On trouve alors une relation linéaire entre U et D :

$$\boxed{D = (26,9 \pm 0,3) \cdot 10^{-3} U}$$

avec la tension exprimée en V et le débit massique en $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$.

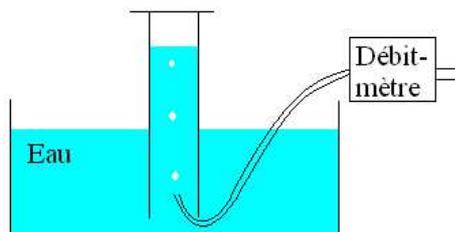


FIG. 1.2 – Principe de l'étalonnage du contrôleur de débit

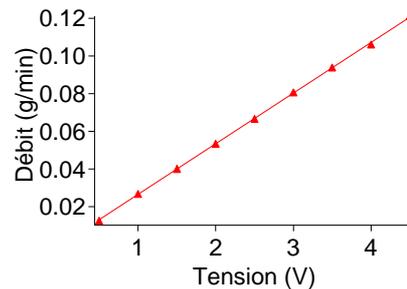


FIG. 1.3 – Courbe d'étalonnage du débit-mètre

1.2.2 Calibrage du capteur de pression

Le deuxième instrument fondamental pour notre expérience est le capteur de pression - modèle 223 BD-00010 AB de MKS Instruments. Celui-ci est constitué d'une membrane qui se déplace suivant les pressions s'exerçant sur chacune de ses faces dont une est en contact avec l'atmosphère; le capteur délivre une tension proportionnelle à la différence de pression. Pour étalonner ce capteur, on le raccorde à un tube en U contenant de l'eau. Initialement, les niveaux d'eau sont à la même hauteur, puis on rajoute de l'eau avec une seringue. La pression du côté du détecteur augmente alors, et est telle que

$$\Delta p = \rho g \Delta h.$$

Ceci permet donc d'étalonner les tensions émises par le capteur. Le capteur utilisé a une loi linéaire telle que :

$$\boxed{\Delta p = (99.0 \pm 0.9) U}$$

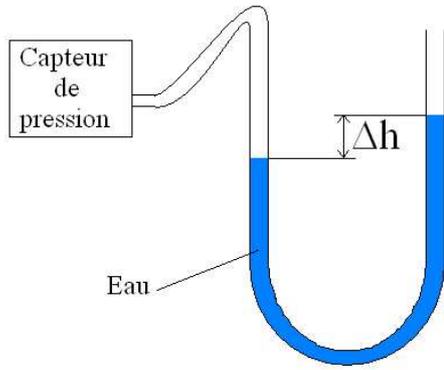


FIG. 1.4 – Principe de l'étalonnage du capteur de pression

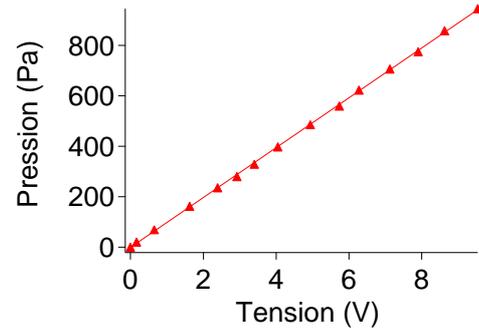


FIG. 1.5 – Courbe d'étalonnage du capteur de pression

1.3 Détermination du volume de la chambre

Un paramètre très important au cours de l'expérience est le volume d'air qui est contenu dans la chambre, c'est-à-dire, entre la sortie du débitmètre et l'orifice d'où sont émises les bulles. Ce volume est déterminé en bloquant par intermittence la sortie d'air et en observant les variations de pression dans le système. En effet, si on considère l'air comme un gaz parfait

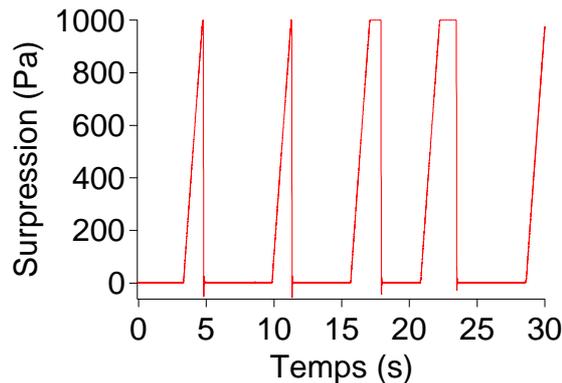


FIG. 1.6 – Variations linéaires successives de la pression lorsque l'on bouche l'orifice de sortie d'air.

à température constante, alors on peut écrire que :

$$\dot{p}V = \frac{DRT}{M}$$

où D est le débit massique de l'air de masse molaire M . Comme le volume est constant, la variation de pression est linéaire en fonction du temps et de pente a donc on trouve que :

$$V = \frac{DRT}{aM}$$

Pour les mesures, on bouche l'orifice à plusieurs reprises et on fait une moyenne des pentes observées. Au cours des expériences, des volumes allant de 34 mL à 161 mL ont été utilisés.

1.4 Propriétés rhéologiques du fluide viscoélastique

Dans la plus grande partie des expériences, j'ai utilisé un fluide viscoélastique à base de salicylate de sodium (NaSal, Sigma Aldrich) et de bromure d'hexadécyltriméthylammonium

(CTAB, Sigma Aldrich). Le mélange de ces deux composants en concentration équimolaire forme des micelles géantes. Nous obtenons ainsi un fluide viscoélastique, dont nous pouvons faire varier la concentration c (et donc les propriétés physiques). Pour mieux connaître ce fluide, il a été soumis à quelques tests rhéologiques.

1.4.1 Viscosimétrie

La mesure de la viscosité est fondamentale pour comprendre quelles sont les propriétés physiques du fluide utilisé. Une telle mesure peut se faire à l'aide d'un rhéomètre qui enserre une faible épaisseur de fluide entre deux éléments plans (éventuellement l'un des deux est conique) et exerce un cisaillement. L'appareil mesure alors le couple qui se crée et on peut remonter à la viscosité η . Celle-ci est définie par la relation

$$\sigma = \eta \dot{\gamma}$$

où σ est la contrainte exercée et $\dot{\gamma}$ la déformation du fluide. Pour l'expérience, un rhéomètre C-VOR de Bohlin Instruments a été utilisé. Le viscoélastique est soumis à une série de cisaillements déterminés permettant l'obtention d'une courbe de viscosité. Pour chaque niveau de cisaillement, il est nécessaire de laisser le fluide atteindre un régime stationnaire (environ 60s).

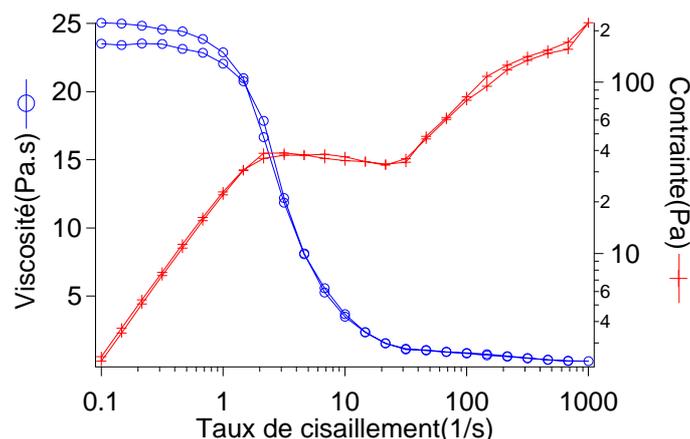


FIG. 1.7 – Courbe de viscosité et de contrainte pour le fluide de 0.1 mol.L^{-1} et une épaisseur de $400 \mu\text{m}$

On trouve pour un faible taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ une viscosité constante de l'ordre de 300 Pa.s pour le fluide le plus concentré (0.5 mol.L^{-1}) et d'environ 25 Pa.s pour le moins concentré (0.1 mol.L^{-1}). Sur cette partie-là, le viscoélastique a un comportement de fluide newtonien parfaitement normal. Pour des taux de cisaillement supérieurs à 1 s^{-1} , la viscosité diminue rapidement pour devenir 10 000 fois plus petite, et ce quelle que soit la concentration du fluide. La contrainte est, elle, d'abord linéaire puis elle marque un plateau au-delà de la fréquence de coupure puis on a de nouveau une augmentation. Cette fréquence de coupure marque les deux modes de comportement du fluide viscoélastique. A faible cisaillement, il coule alors qu'à fort taux de cisaillement, il devient élastique. Le graphique présente deux courbes tant pour la contrainte que pour la viscosité, cela correspond à une première série de mesure effectuée dans le sens croissant du taux de cisaillement puis à une seconde dans le sens décroissant. Ceci permet de voir si l'on a un phénomène d'hystérésis sensible ou non. Ce n'est pas le cas ici, ce qui justifie *a posteriori* le temps d'attente choisi entre deux mesures successives.

1.4.2 Mesures en oscillations

Nous avons ensuite soumis le fluide à des oscillations de cisaillement afin de déterminer la réponse du viscoélastique à une telle excitation. On peut fixer l'amplitude des oscillations pour une épaisseur de fluide donnée. On impose au fluide des cisaillements de différentes fréquences sur une échelle de 0.001 Hz à 100 Hz. On peut alors déterminer la viscosité complexe $\eta^*(\omega)$ et le module de cisaillement complexe $G^*(\omega)$. Ces deux variables sont reliées à la contrainte et à la déformation par :

$$\begin{aligned}\sigma(t) &= G^*(\omega)\gamma(t) \\ \sigma(t) &= \eta^*(\omega)\dot{\gamma}(t)\end{aligned}$$

Le module de cisaillement complexe se décompose en $G^* = G' + iG''$, où G' correspond au module élastique qui traduit la réponse élastique et G'' au module de perte caractérisant la réponse visqueuse. On peut donc définir deux régimes : visqueux si $G'' \gg G'$ et élastique $G' \gg G''$. Les mesures ont été effectuées pour différents cisaillement et toujours pour une épaisseur de 400 μm . D'autres mesures de viscosité ont été effectuées pour une épaisseur de 800 μm , ainsi que pour un fluide plus concentré ($c = 0.5 \text{ mol.L}^{-1}$). Ces résultats sont présentés en annexe.

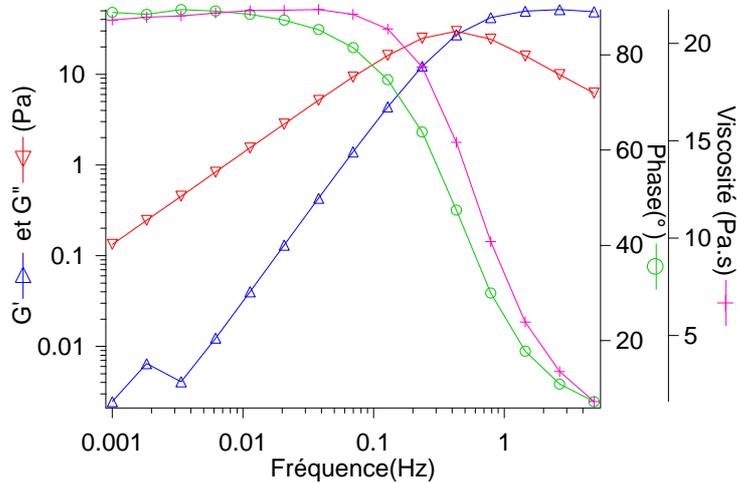


FIG. 1.8 – Réponse du fluide à 0.1 mol.L^{-1} à des oscillations de cisaillement d'une amplitude de $400 \mu\text{m}$

On observe que pour les fréquences faibles, c'est la réponse visqueuse qui domine puis on a G' qui domine à partir de 1 Hz environ ce qui correspond, d'une part, au point de chute de la viscosité complexe et d'autre part, à la valeur de $\dot{\gamma}$ pour laquelle la viscosité chute dans l'expérience de viscosimétrie. On retrouve, ici, les deux comportements visqueux et élastique qui caractérisent ce fluide que l'on peut qualifier de maxwellien vues les courbes des modules élastique et visqueux.

Chapitre 2

Etude des régimes d'écoulement de l'air à travers le fluide

2.1 Premières tentatives

En premier lieu, j'ai essayé de travailler avec du gel à coiffer (marque Auchan) dilué de moitié. Ce gel est un fluide à seuil, c'est-à-dire que des bulles d'air d'une taille inférieure à une longueur caractéristique restent prisonnières au sein du gel. On observe des bulles assez régulières mais il est délicat d'obtenir un canal ouvert permanent, car la présence de surfactant en grande quantité fait que ce gel a tendance à mousser, perturbant ainsi tout le système. Nous avons donc décidé d'utiliser un fluide viscoélastique qui se comporte de façon plus stable au passage des bulles. Dans la majeure partie des expériences, il y avait une épaisseur de 5 mm de fluide de concentration 0.1 mol.L^{-1} ou 0.5 mol.L^{-1} .

2.2 Observation des régimes

2.2.1 Les régimes

◇ A faible débit d'air, on observe le passage de bulles d'air isolées. Toutefois, ce ne sont pas des bulles périodiques comme on peut l'observer dans des systèmes granulaires. En effet, il y a d'abord une augmentation régulière de la pression dans la chambre, suivie d'un lâcher de bulles avec une fréquence décroissante jusqu'à ce que la pression retombe à zéro. Ces trains de bulles sont en revanche assez réguliers.

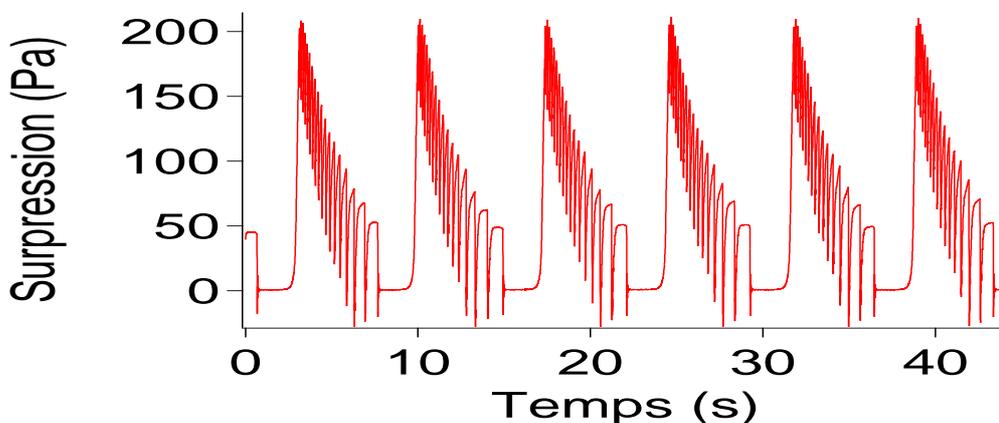


FIG. 2.1 – Un exemple de régime bullaire ($c=0.1 \text{ mol.L}^{-1}$, $V=105 \text{ mL}$, $D=0.054 \text{ g.min}^{-1}$)

◊ A fort débit, la pression est suffisante pour que les bulles laissent place à un canal ouvert avec un écoulement d'air permanent. Cependant, ce canal n'est jamais parfaitement cylindrique : on observe qu'il est constitué d'une chaîne de bulles connectées les unes aux autres et de géométrie assez variable. Ceci explique que la surpression n'est alors pas constante, mais oscille au cours du temps.

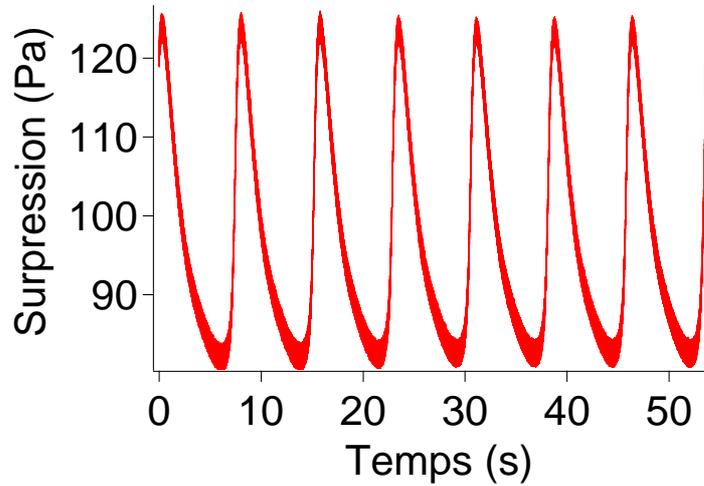


FIG. 2.2 – Un exemple de canal ouvert ($V=105$ mL, $c=0.1$ mol.L⁻¹, $D=0.108$ g.min⁻¹)

On peut également noter que même lorsqu'il survient des variations "accidentelles" mais parfois fortes de la pression au sein de la chambre, les oscillations globales du canal ne sont pas perturbées. Il semble qu'il y ait un parfait découplage entre les oscillations basses fréquences du canal et les variations rapides et soudaines de la pression.

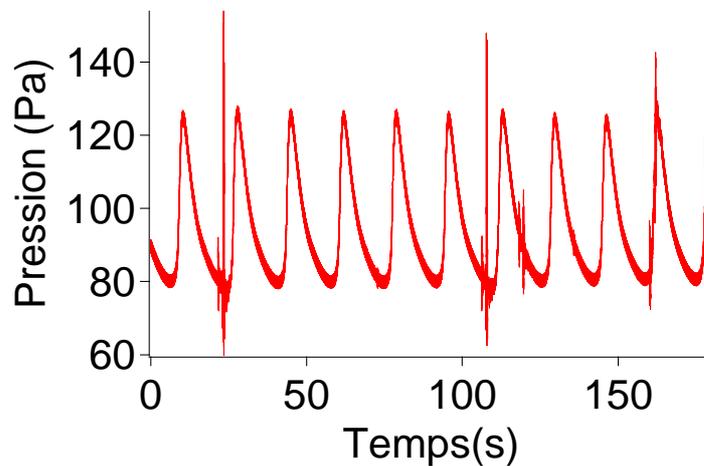


FIG. 2.3 – Un exemple de phénomène très bref qui n'a aucun impact sur le signal global ($V=161$ mL, $c=0.1$ mol.L⁻¹, $D=0.094$ g.min⁻¹)

◊ Pour ce qui est du régime intermédiaire, on est en fait dans une zone transitoire où l'on a tantôt un canal ouvert, tantôt des bulles car le canal n'est pas assez stable pour rester ouvert.

Le but de l'expérience est d'observer la transition d'un régime à un autre en fonction du volume de la chambre.

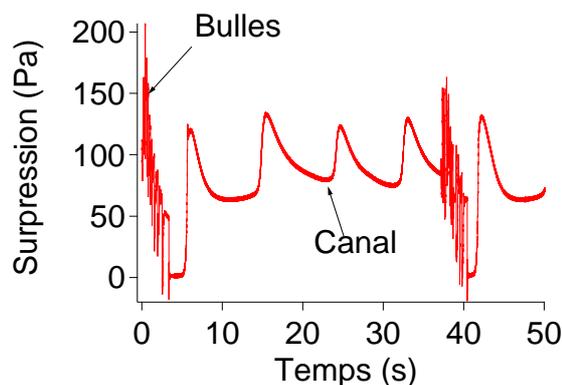


FIG. 2.4 – Un exemple d’instabilités du canal ouvert ($V=105$ mL, $c=0.1$ mol.L⁻¹, $D=0.074$ g.min⁻¹)

2.2.2 Diagramme des régimes

Il a été intéressant d’observer à quel moment intervient la transition entre les différents régimes si on fait varier certains paramètres. La concentration du fluide est fixée à 0,1 mol.L⁻¹ en réactifs sur une hauteur de 5 mm. Le volume et le débit sont les paramètres variables. L’observation est assez délicate car il est nécessaire d’attendre un certain temps de transition pour faire la différence entre un régime intermédiaire et un vrai canal ouvert. Les acquisitions sont d’une durée d’au moins trois minutes afin de s’assurer sensiblement de la stabilité du régime. Il est difficile de définir proprement une transition nette et franche entre un régime et l’autre. On ne trouve qu’une plage de transition qui est le régime intermédiaire. Par ailleurs, on observe que plus le volume augmente, plus le débit nécessaire à la stabilisation d’un canal ouvert est grand. En effet, si le volume est grand il faut un débit plus important pour faire monter suffisamment la pression dans la chambre. Globalement, on a une transition assez linéaire, ce qui laisse supposer que l’on a un temps caractéristique du fluide permettant de ramener le débit et le volume à un seul paramètre temporel $\tau = \alpha \frac{V}{D}$ avec $\alpha = \frac{Mp}{RT}$ où M est la masse molaire de l’air.

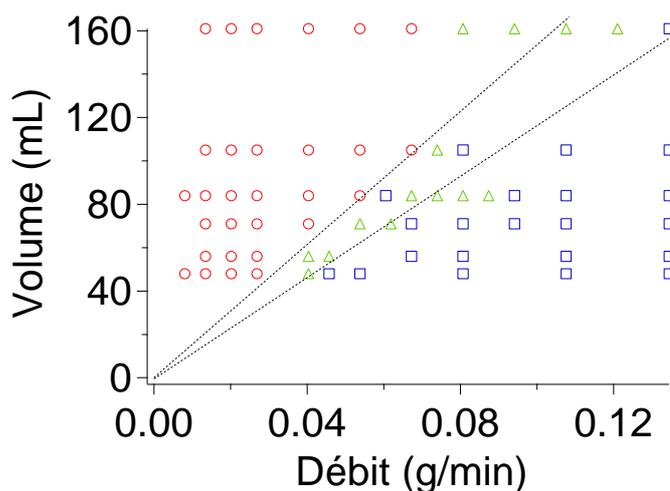


FIG. 2.5 – Diagramme des états. En rouge, régime bullaire ; en bleu, canal ouvert ; en vert, régime intermittent. Les deux droites donnent une idée de la position de la transition.

2.2.3 Le régime bullaire

Les mesures successives ont fait apparaître une grande régularité du régime avec bulles. Chaque train de bulles est en effet semblable au précédent en ce qui concerne la pression maximale atteinte et au nombre de bulles par lâcher. J'ai effectué une étude statistique de ces trains de bulles en fonction du débit et du volume de la chambre. On trouve alors que la pression maximale est indépendante du volume de la chambre et aussi du débit. Ceci est assez logique car la pression à exercer pour créer et laisser passer une bulle d'air dans le fluide doit dépendre uniquement du fluide et de la hauteur de ce dernier.

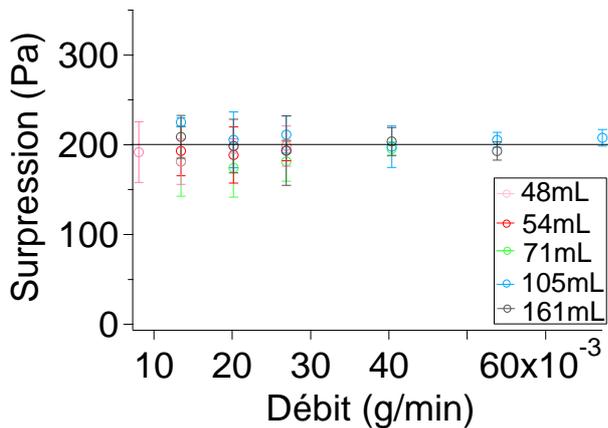
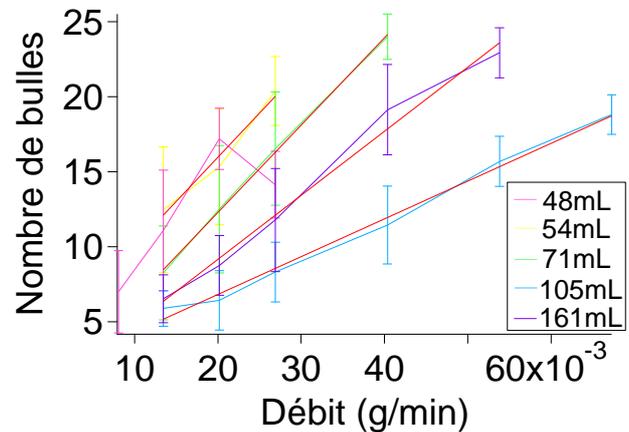


FIG. 2.6 – Diagramme des pressions maximales moyennes en fonction du débit et pour différents volumes. La droite à 200 Pa situe approximativement la valeur moyenne des surpressions maximales

Pour ce qui est du nombre de bulles par groupe, on trouve une augmentation du nombre de bulles avec le débit mais globalement une certaine décroissance avec le volume, encore que celle-ci soit assez discutable pour 48 mL et pour 161 mL comme on peut le voir sur le graphique.

FIG. 2.7 – Nombre de bulles par train de bulles en fonction du débit et à différents volumes. Les droites en rouges sont des modélisations linéaires pour chaque série d'expérience à V fixé.



2.3 Fluide très concentré

Afin de déterminer l'influence des propriétés physiques du fluide sur les différents régimes précédents, j'ai recommencé l'expérience avec un gel plus concentré, à 0.5 mol.L⁻¹. De façon générale, on ne trouve que des canaux ouverts qui sont toutefois un peu différents des précédents quant aux signaux de pression. Je me suis fixé à un petit volume V d'environ 35-40 mL et j'ai augmenté la hauteur de fluide. J'ai trouvé à très bas débit quelques bulles pour une épaisseur

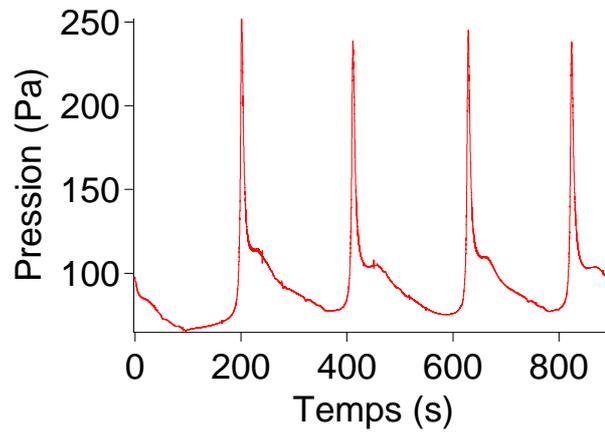


FIG. 2.8 – Un exemple de canal ouvert ($c=0.5 \text{ mol.L}^{-1}$, $D= 0.081 \text{ g.min}^{-1}$, $V=77 \text{ mL}$)

de 12 mm. Cela correspond souvent à un régime intermédiaire plus qu'à un régime de bulles. Sinon, le canal reste ouvert, même à 36 mm d'épaisseur.

Il est intéressant de noter que lorsque l'épaisseur augmente, la géométrie du canal devient très complexe et pas régulière comme c'était le cas dans le fluide à 0.1 mol.L^{-1} . En effet, le canal peut devier de la verticale et former des coudes parfois à angle droit. Ce phénomène est probablement dû au fait que le fluide est précisailé et présente ainsi des chemins préférentiels : le canal n'a ainsi pas tendance à suivre une ligne droite, mais plutôt à passer par ces zones précontraintes du viscoélastique. De plus, il est assez déconcertant d'observer que la géométrie peut changer soudainement. Il y a alors émission d'un sifflement audible, suivi d'une modification très rapide (moins d'une seconde) du canal. Ces observations montrent que le régime canal ouvert est une configuration active et non stationnaire du fluide et que des modifications importantes peuvent intervenir au cours du temps.

Chapitre 3

Etude fréquentielle des phénomènes

3.1 Etude fréquentielle des pics dans les régimes "bulles" et "canal"

La régularité et la périodicité des signaux obtenus dans les différents régimes m'ont incité à les étudier de façon plus systématique. Je voulais voir s'il y avait continuité entre la période des trains de bulles dans le régime avec bulles et celle des oscillations du canal ouvert. L'étude a été effectuée à différents volumes et débits. Il en ressort que la période des trains de bulles reste relativement constante en fonction du volume et du débit. Les fréquences d'oscillations du canal sont, en revanche, d'une part beaucoup plus faibles, et ont, d'autre part, tendance à augmenter avec le débit. En outre, la période semble diminuer globalement avec le volume à l'exception de 48 mL et 161 mL - comme les anomalies constatées dans le graphe caractérisant les trains de bulles ; nous n'avons pu fournir d'explication à cette observation.

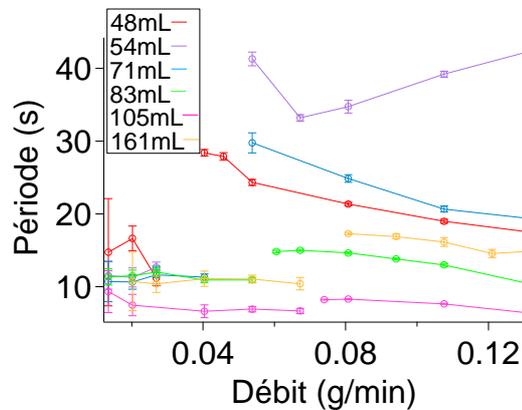


FIG. 3.1 – Diagramme des périodes des trains de bulles ou des oscillations en fonction du débit pour une concentration de 0.1 mol.L^{-1} . noter la discontinuité entre les régimes "bulle" et "canal"

La même étude sur les canaux ouverts en fluide plus concentré ne permet pas d'aboutir à une conclusion particulière si ce n'est une certaine décroissance en fonction du débit. Par ailleurs, si on fait la même étude en fonction de la hauteur de fluide, on observe une diminution de la fréquence avec l'épaisseur. Il faut cependant souligner le problème de la variation incessante de la géométrie du canal, qui a un impact certain sur la fréquence d'oscillation.

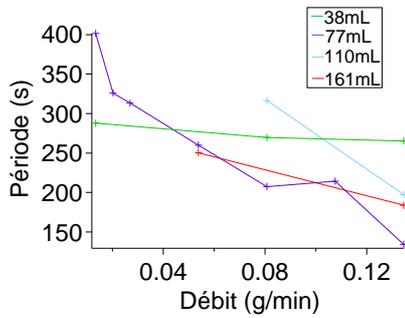


FIG. 3.2 – Période des oscillations d'un canal ouvert dans un fluide à 0.5 mol.L^{-1} en fonction du débit et du volume

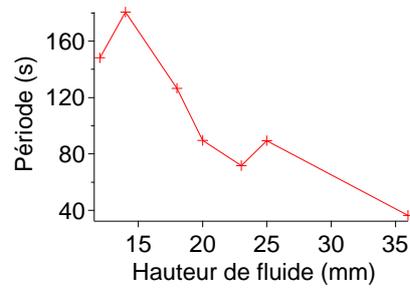


FIG. 3.3 – Influence de la hauteur ($c=0.5 \text{ mol.L}^{-1}$, $V=34 \text{ mL}$ et $D=0.135 \text{ g.min}^{-1}$)

3.2 Etude fréquentielle du lâcher de bulles

Nous nous intéressons ici au contenu fréquentiel de la cascade de bulles observée lors du lâcher suivant la montée en pression dans la chambre (voir fig 2.1). On observe que le temps entre deux bulles successives augmente. J'ai donc cherché à déterminer quelles sont les caractéristiques de cette diminution de fréquence. J'ai fait une étude statistique de la pression moyenne durant l'émission d'une bulle en fonction du temps Δt entre deux émissions successives. Il semble y avoir deux régimes différents, l'un à haute fréquence et le suivant à basse fréquence.

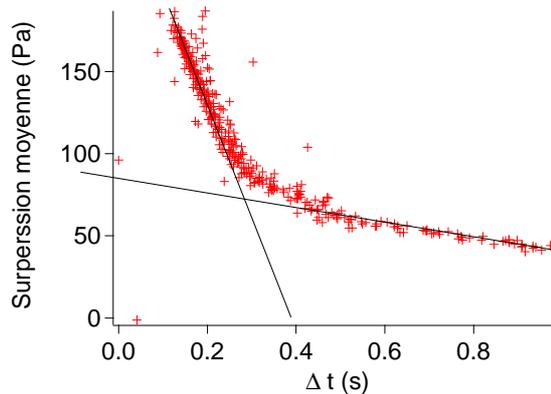


FIG. 3.4 – Pression moyenne d'une bulle en fonction du temps d'émission ($V=161 \text{ mL}$, $h=5 \text{ mm}$, $c=0.1 \text{ mol.L}^{-1}$, $D=0.054 \text{ g.min}^{-1}$)

Les courbes que j'ai obtenues restent inchangées quand le débit et le volume varient et l'intersection des deux régimes définit une pression seuil de l'ordre de $71.6 \pm 5.2 \text{ Pa}$ (cette valeur provient d'une statistique effectuée à différents débits et volumes). Une hypothèse est que cette pression seuil pourrait correspondre à la contrainte seuil séparant les comportements visqueux et élastique du fluide. Cette hypothèse est compatible avec les résultats de notre étude rhéologique (voir section 1.4).

3.3 De multiples fréquences

Il reste encore bon nombre de fréquences qui apparaissent dans les signaux. Tout d'abord, on observe parfois des oscillations amorties en fin de lâcher de bulles. Ces oscillations sont d'une amplitude de l'ordre de la dizaine de Pascals. La fréquence caractéristique est d'environ 25Hz.

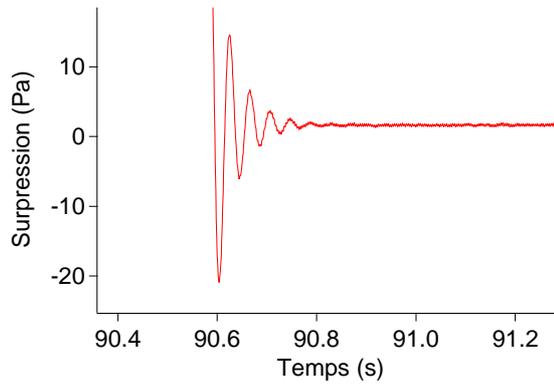


FIG. 3.5 – Exemples d’oscillations amorties à 23Hz ($V=161\text{mL}$, $c=0.1 \text{ mol.L}^{-1}$, $D=0.020 \text{ g.min}^{-1}$)

Dans les canaux ouverts, on observe assez souvent au sommet des oscillations qui sont au début d’environ 10 Hz puis qui passent à 30Hz pour se restabiliser ensuite. Dans le même temps, dans la pente descendante des oscillations du canal, il y a quelques accidents qui sont parfois d’assez forte amplitude (20-50 Pa) et dans une gamme de haute fréquence.

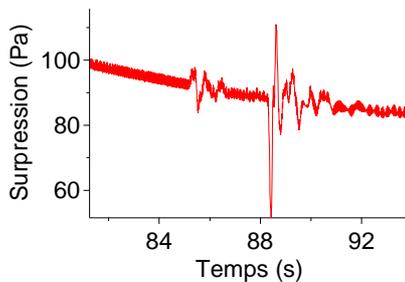


FIG. 3.6 – Oscillations pendant un canal ouvert ($V=54\text{mL}$, $c=0.1 \text{ mol.L}^{-1}$, $D=0.081 \text{ g.min}^{-1}$)

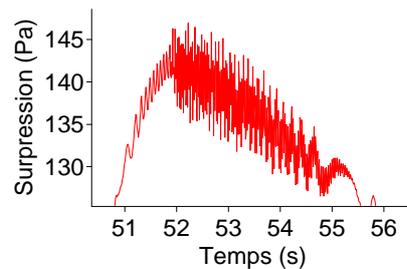


FIG. 3.7 – Oscillations du sommet du signal périodique ($V=54\text{mL}$, $c=0.1 \text{ mol.L}^{-1}$, $D=0.081 \text{ g.min}^{-1}$)

La question qui se pose alors inévitablement est : quelle est l’origine de ces fréquences ? Pour le savoir, j’ai monté une expérience complémentaire permettant de déterminer les résonances propres du viscoélastique afin de voir si une corrélation existe avec les observations précédentes

3.4 Etude de certaines résonances

3.4.1 Expérience

L’idée est d’étudier les résonances du viscoélastique lorsqu’il est soumis à une excitation de surface. Le but étant de recréer artificiellement les conséquences d’une excitation par le passage d’une bulle. Pour cela, on immerge des billes de moitié dans le fluide, et on les fait osciller verticalement à l’aide d’un vibreur - le montage des billes sur le vibreur a été réalisé grâce à des tiges que j’ai pu usiner après ma formation pratique, au cours de ce stage, sur le tour et la fraiseuse à l’AFPI. On envoie un faisceau laser sur la surface du fluide et on repère les résonances par le maximum d’amplitude des oscillations du rayon réfléchi par la surface du fluide. Les oscillations sont soit acquises par un capteur de position, soit observées à l’oeil sur un écran.

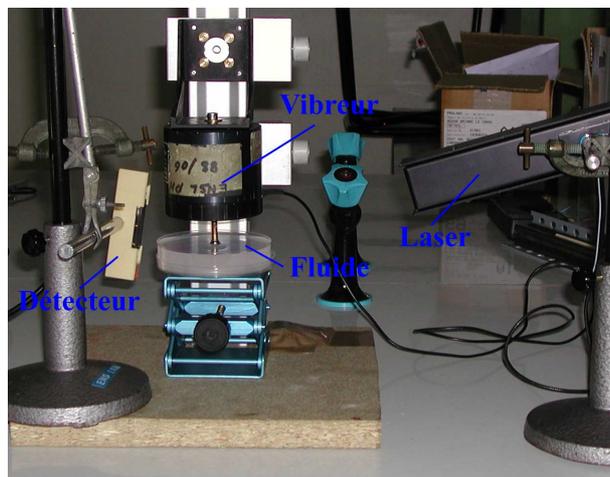


FIG. 3.8 – Montage expérimental d'étude des résonances

3.4.2 Résultats

Le viscoélastique possède des résonances qui s'échelonnent entre 10Hz et 100Hz. Au-delà, il n'y a aucun pic de résonance et en deçà, il ne semble pas y en avoir mais il est difficile de le confirmer avec certitude étant donnée la précision de l'expérience. Par ailleurs, on trouve toujours une résonance aux alentours de 12 – 13Hz mais au-dessus, il y a quelques variations. L'expérience a été faite pour trois tailles de bille (6mm, 8mm et 10mm de diamètre) et dans des récipients de géométries différentes. On remarque que la taille de la bille ne change pas fondamentalement les fréquences de résonance et il en est de même pour la hauteur du récipient. En revanche, le diamètre et la forme du récipient semblent avoir plus d'influence. Malheureusement, il est difficile de trouver une loi propre à ce viscoélastique. L'expérience a été menée sur un gel à cheveux beaucoup plus visqueux pour essayer d'amoinrir les éventuels effets de bord, mais aucune variation systématique n'a pu être trouvée dans ce cas non plus.

TAB. 3.1 – Fréquences de résonance (en Hz) pour le fluide viscoélastique de 0.1mol.L^{-1} pour différentes hauteur h différents diamètres d du récipient et b de la bille (b1 correspond à un diamètre $b = 6$ mm, b2 à 8 mm et b3 à 10 mm)

$h = 1.3\text{cm } d = 8.8\text{cm}$			$h = 0.5\text{cm } d = 7.4\text{cm}$			$h = 1.2\text{cm } d = 7.4\text{cm}$			$h = 4.5\text{cm}$
									$d = 9.3\text{cm}$
b1	b2	b3	b1	b2	b3	b1	b2	b3	b1
10.3	10	9	13	13	13	12	12	12	5
14	12	12	17	18	18	14	14	15	8
23	16	17	25	25	25	18	17	17	11
34	21	23	30	30	27	22	21	22	14
45	26	25	33	34	36	25	25	27	17.5
56	32	36	66	69	69	27	29	31	21
	69	39				31	33		
						35	37		
						41	41		

TAB. 3.2 – Fréquences de résonance (en Hz) pour le gel à coiffer non dilué pour différentes hauteur h différents diamètres d du récipient et b de la bille (b1 correspond à un diamètre $b = 6$ mm, et b3 à 10 mm)

$h = 2.2\text{cm } d = 7.4\text{cm}$		$h = 4.8\text{cm } d = 7.4\text{cm}$		$h = 2.2\text{cm } d = 5.5\text{cm}$	
b1	b3	b1	b3	b1	b3
14	14	13	13	19	19
22	22	23	23	37	37
32	36	40	40		
45	46				

Conclusion

Ce stage a permis une première caractérisation de la dynamique de l'écoulement d'air à travers un fluide visqueux. Il est manifeste que l'on a deux régimes parfaitement distincts. Premièrement, un régime où des bulles s'échappent par groupe. Deuxièmement, pour un débit suffisant, on a apparition d'un canal stable. Entre les deux, le canal peut être instable et se transformer en une succession de bulles ; c'est notre régime intermédiaire. L'étude fréquentielle qui a été faite a, certes, laissé beaucoup de questions sans réponse, surtout en ce qui concerne les hautes fréquences. Toutefois, l'étude en basses fréquences a permis de mettre en lumière certaines discontinuités, par exemple dans la transition entre les bulles et le canal ouvert, ou bien la rupture de pente de la courbe de fréquence lors des lâchers de bulles que l'on pourra tenter d'expliquer par des considérations rhéologiques un peu plus poussées.

Ce sujet est très riche, et il existe de nombreux paramètres que l'on n'a pas eu le temps de faire varier pour déterminer leur influence (diamètre de l'orifice, concentration, ...) et qui doivent avoir une grande importance.

Il serait certainement intéressant d'enrichir l'étude fréquentielle avec une perspective acoustique. En effet, une première étude a été faite sur des bulles isolées [6] mais il serait bon d'analyser, dans notre expérience, les enregistrements acoustiques pour chaque régime. Nous espérons que ces diverses expériences à l'échelle du laboratoire offriront une meilleure compréhension, sur le terrain, des remontées de gaz à travers le magma, ou, de manière plus générale, de la dynamique des fluides complexes.

Bibliographie

- [1] Patrick Oswald, *Rhéophysique ou comment coule la matière*, Belin, 2005
- [2] Bruno Issenmann, *Etude de la dynamique de l'émission d'un gaz au travers d'une couche de matériau granulaire immergé*, rapport de stage ENSL, 2000-2001
- [3] L. Gostiaux, H. Gayvallet, J-C Géminard, *Dynamics of a gas bubble rising through a thin immersed layer of granular material : an experimental study*, Granular Matter 4,39-44, 2002
- [4] P. Snabre, F. Magnifotcham, *Formation and rise of a bubble stream in a viscous liquid*, The European Physical Journal B 4, 369-377, 1998
- [5] Andrew Belmonte, *Self-oscillations of a cused bubble rising through a micellar solution*, Rheol Acta, 554-559, 2000
- [6] T. Divoux, *Listening to singing bubbles at the free surface of a non-newtonian fluid*, stage de recherche de 2ème année du MiP, 2004

Annexes

Vous trouverez dans ces annexes les courbes de rhéologie que j'ai obtenues en modifiant certains paramètres.

Viscométrie

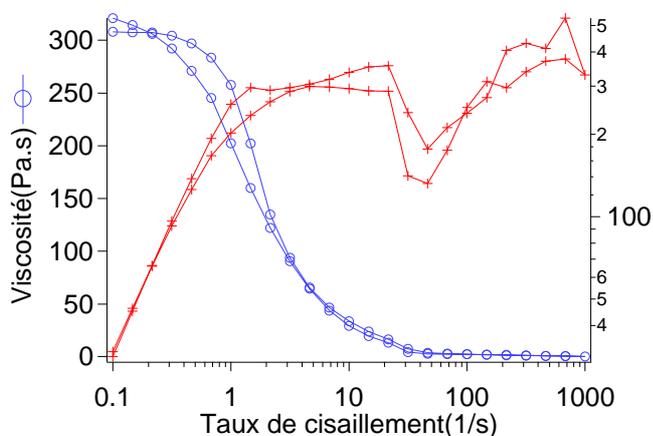
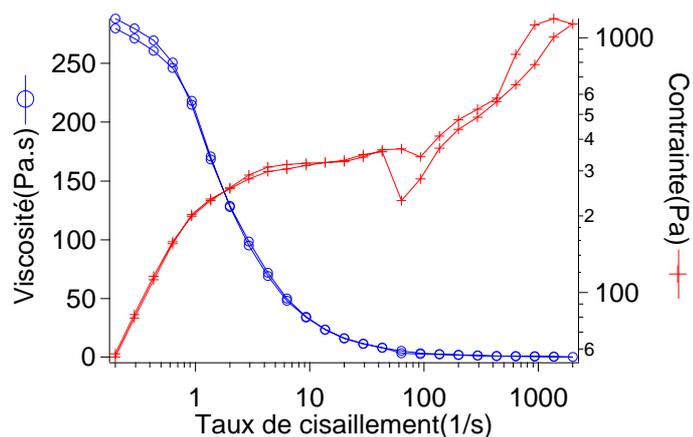


FIG. 3.9 – Courbes de viscosité et de contraintes pour le fluide à 0.5 mol.L⁻¹ et une épaisseur de 800 μm

FIG. 3.10 – Courbes de viscosité et de contraintes pour le fluide à 0.5 mol.L⁻¹ et une épaisseur de 400 μm



Oscillations en cisaillement

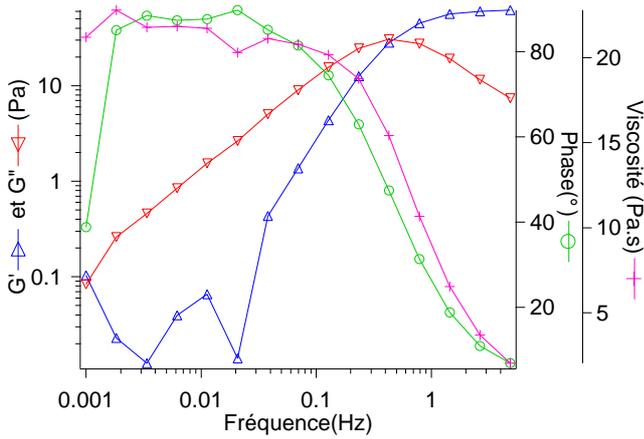


FIG. 3.11 – Courbes de réponse aux oscillations par cisaillement pour le fluide à 0.1 mol.L^{-1} , une épaisseur de $400 \mu\text{m}$ et amplitude de $4 \mu\text{m}$

FIG. 3.12 – Courbes de réponse aux oscillations par cisaillement pour le fluide à 0.1 mol.L^{-1} , une épaisseur de $400 \mu\text{m}$ et amplitude de $40 \mu\text{m}$

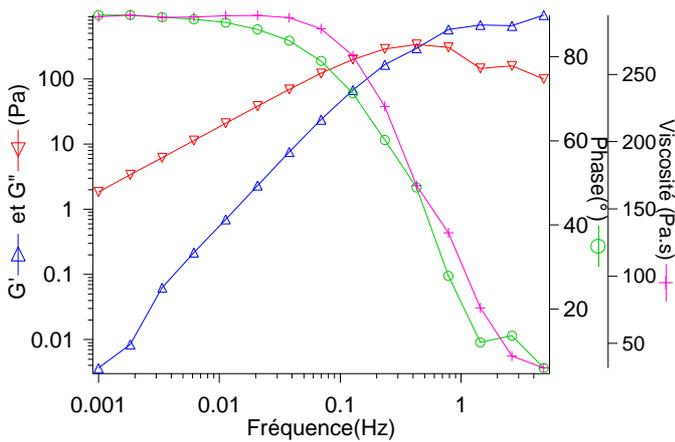
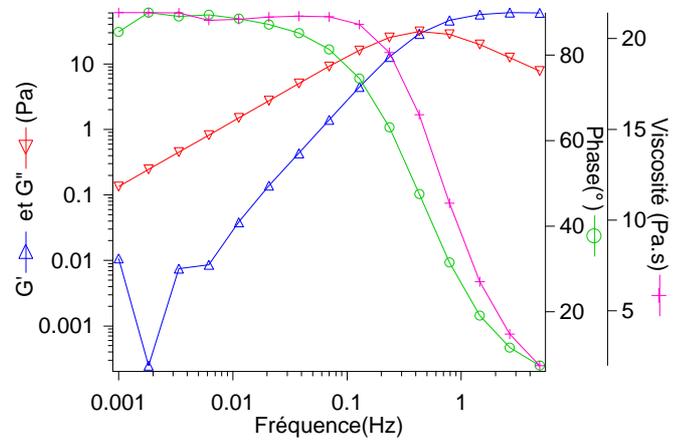


FIG. 3.13 – Courbes de réponse aux oscillations par cisaillement pour le fluide à 0.5 mol.L^{-1} , une épaisseur de $400 \mu\text{m}$ et amplitude de $400 \mu\text{m}$

FIG. 3.14 – Courbes de réponse aux oscillations par cisaillement pour le fluide à 0.5 mol.L^{-1} , une épaisseur de $400 \mu\text{m}$ et amplitude de $40 \mu\text{m}$

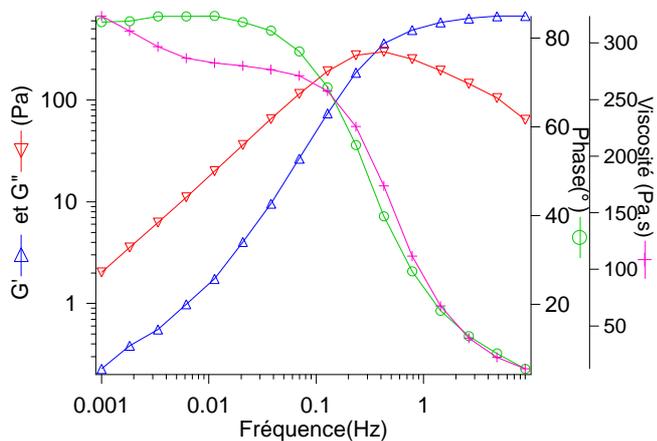
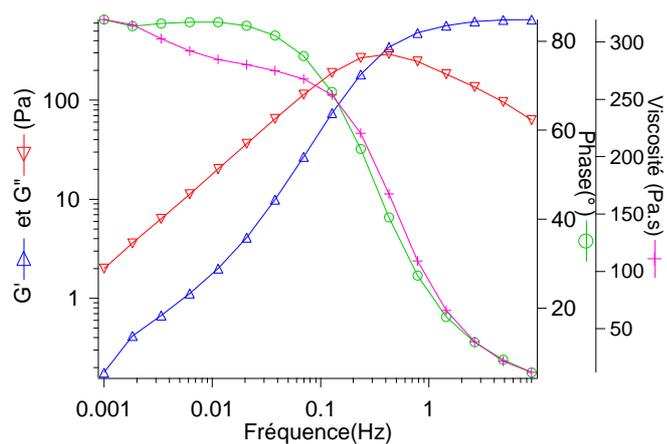


FIG. 3.15 – Courbes de réponse aux oscillations par cisaillement pour le fluide à 0.5 mol.L^{-1} , une épaisseur de $400 \mu\text{m}$ et amplitude de $4 \mu\text{m}$

FIG. 3.16 – Courbes de réponse aux oscillations par cisaillement pour le fluide à 0.5 mol.L^{-1} , une épaisseur de $400 \mu\text{m}$ et amplitude de $4000 \mu\text{m}$

