

Brothelande Elodie
Vannière Benoit
M1 PCTP ENS-Lyon

Etude analogique du dégazage intermittent dans un système volcanique modèle



Sous la direction de :
Valérie Vidal
Laboratoire de Physique de l'ENS-Lyon

Fevrier-Avril 2008

I) Introduction

1) Problématique :

Lors d'une éruption volcanique, le magma subit dans son ascension une décompression. Les gaz dissouts sont alors exsolvés, il y a nucléation de bulles dont la taille continue d'augmenter au fur et à mesure que la pression diminue. La croissance des bulles est un des moteurs de l'éruption, puisque les gaz nouvellement formés occupent un volume important.

Bien que la nucléation se fasse de manière homogène dans l'ensemble du fluide, l'éruption se manifeste de manière discontinue en surface. Un des objets de cette étude est de comprendre comment s'opère la conversion entre un phénomène continu, le dégazage, et un phénomène intermittent, l'éruption.

Deux études ont exploré différentes hypothèses pour expliquer ces régimes intermittents. Jaupart et Vergnolle avancent des arguments géométriques de la chambre. Divoux et al [3] étudient plutôt l'influence des propriétés rhéologiques du fluide.

2) Historique :

Jaupart et Vergnolle ont tenté de répondre à cette question en 1988 [1]. Pour cela, ils ont réalisé un dispositif composé d'une cuve cylindrique (modélisant la chambre magmatique) surmonté d'un conduit. Plusieurs buses, réparties de manière homogène à la base injectent du gaz dans le système qui est rempli d'un fluide newtonien.

Jaupart et Vergnolle mettent en évidence trois régimes en fonction de la viscosité du fluide.

Pour les viscosités les plus faibles, inférieures à 10^{-2} Pa.s, une mousse se forme au toit de la cuve. Un régime stationnaire s'établit : un flux de bulles libérées dans le conduit compense l'arrivée de bulles sous le toit de la chambre. Le niveau de fluide dans la colonne ne varie pas. Pour les viscosités intermédiaires, les bulles s'accumulent sous le toit et coalescent soudainement. La grande bulle ainsi formée est libérée dans le conduit. On observe alors de grande variation du niveau du fluide dans la colonne.

Enfin, pour les viscosités les plus fortes, la mousse ne collapse que partiellement, et les variations du niveau du fluide dans le conduit sont relativement faibles.

Plus récemment, Divoux et al [3] ont étudié le dégazage intermittent au travers d'une colonne de fluide non-newtonien. En injectant un débit continu de gaz à la base, ils observent deux régimes : soit les bulles formées à la base remontent dans la colonne de manière indépendante les unes des autres (régime « bulles »), soit elles coalescent pour former un canal continu (régime « canal ouvert »). On peut expliquer ce second régime puisque la première bulle cisaille le gel et modifie ses propriétés rhéologiques si bien que les bulles suivantes peuvent rejoindre la première bulle et former un chapelet. Notons bien que ce sont les propriétés visco-élastiques du fluide qui permettent la formation et le maintien d'un tel canal. Divoux et al montrent donc que le caractère rhéofluidifiant peut engendrer plusieurs régimes à débit constant, au contraire de l'expérience précédente où la diversité des régimes observés est le fruit de variations du débit et de la viscosité du fluide. Divoux et al montrent également que le pourcentage du temps passé à faire des bulles est une fonction du débit, et que l'on ne peut pas établir un temps caractéristique d'un régime bulle.

3) Objectif :

L'objectif de ce projet est de tenir compte à la fois de l'influence de la géométrie de la chambre et des propriétés rhéologiques du fluide. Nous reprenons l'expérience de T. Divoux en modifiant la géométrie de façon à se rapprocher du dispositif de Jaupart et Vergnolle, et

donc des modèles volcaniques les plus simples. Comme fluide non newtonien, nous avons choisi un gel à cheveux Auchan dilué à 20% (dont nous avons étudié les propriétés rhéologiques). A la différence du dispositif de Jaupart et Vergnolle, l'air est injecté au niveau d'une seule arrivée à la base pour des questions de simplicité. A terme l'objectif est de mieux répartir les arrivées d'air et ce sera peut être l'objet d'une nouvelle expérience.

II) Le montage expérimental

1) Description du montage :

Notre système se compose d'une cuve (diamètre : 15 cm, hauteur : 10 cm) surmontée d'un conduit (diamètre intérieur : 5 cm, hauteur : 20 cm). Le conduit est fixé à l'aide de deux joints qui assurent l'étanchéité et qui maintiennent le conduit à la verticale. On peut régler la hauteur de la colonne qui pénètre plus ou moins dans la cuve, si bien que l'on contrôle le volume de la chambre d'air qui peut se former dans la cuve (Figure 1).

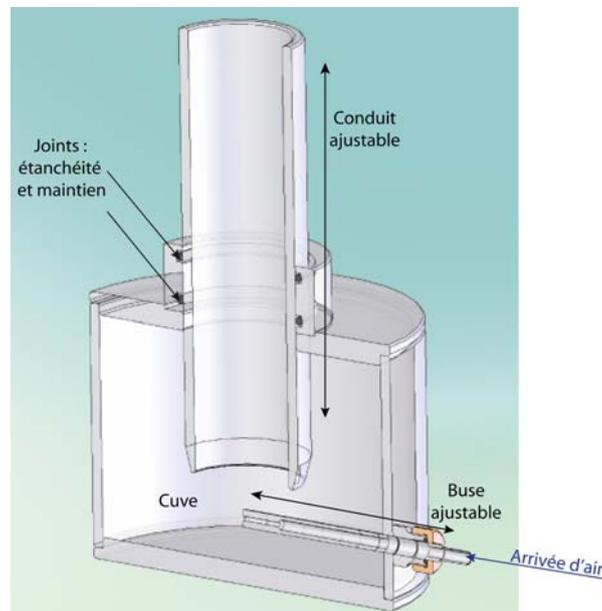


Figure 1 : Schéma tridimensionnel du système volcanique modèle utilisé dans l'expérience. Il se compose d'une cuve surmontée d'un conduit. Le gaz injecté peut former une chambre au toit de la cuve.

Ce système a été fabriqué dans le cadre de notre projet expérimental par l'Atelier Mécanique du laboratoire. Les dimensions exactes des pièces sont données en annexe 1.

Grâce à un système composé d'un détendeur, d'un manomètre et de capillaires dont il est question au paragraphe 2, un débit d'air constant est imposé à l'entrée de la cuve. Un autre élément s'intercale entre le système d'alimentation en air et la cuve : une chambre sèche dont on fixe le volume libre d'air en la remplissant d'eau. Cette chambre sèche remplit une double fonction. D'une part, elle permet d'humidifier l'air qui va être amené à traverser le gel pour qu'il ne sèche pas. D'autre part, comme le montrent Divoux et al [3], le volume de cette chambre est un paramètre déterminant dans l'élasticité globale du système et donc dans le mode de dégazage qui se met en place.

Un capteur mesure la pression entre la chambre sèche et la buse (voir Figure 2). Une routine en C permet de d'acquérir les résultats. Cette mesure de pression située à cet endroit du dispositif donne une information sur tous les phénomènes dans la cuve. Dans le dispositif s'établit un gradient de pression hydrostatique, si la chambre se vide par exemple, on peut enregistrer un différentiel de pression. La formation d'une bulle crée des oscillations de pression qu'on ne retrouve pas dans le cas d'un canal ouvert. Enfin les bulles à la base sont

plus petites que les bulles qui se déversent dans le conduit, si bien que les signaux ne sont pas les mêmes, l'amplitude du signal est plus faible dans le premier cas.

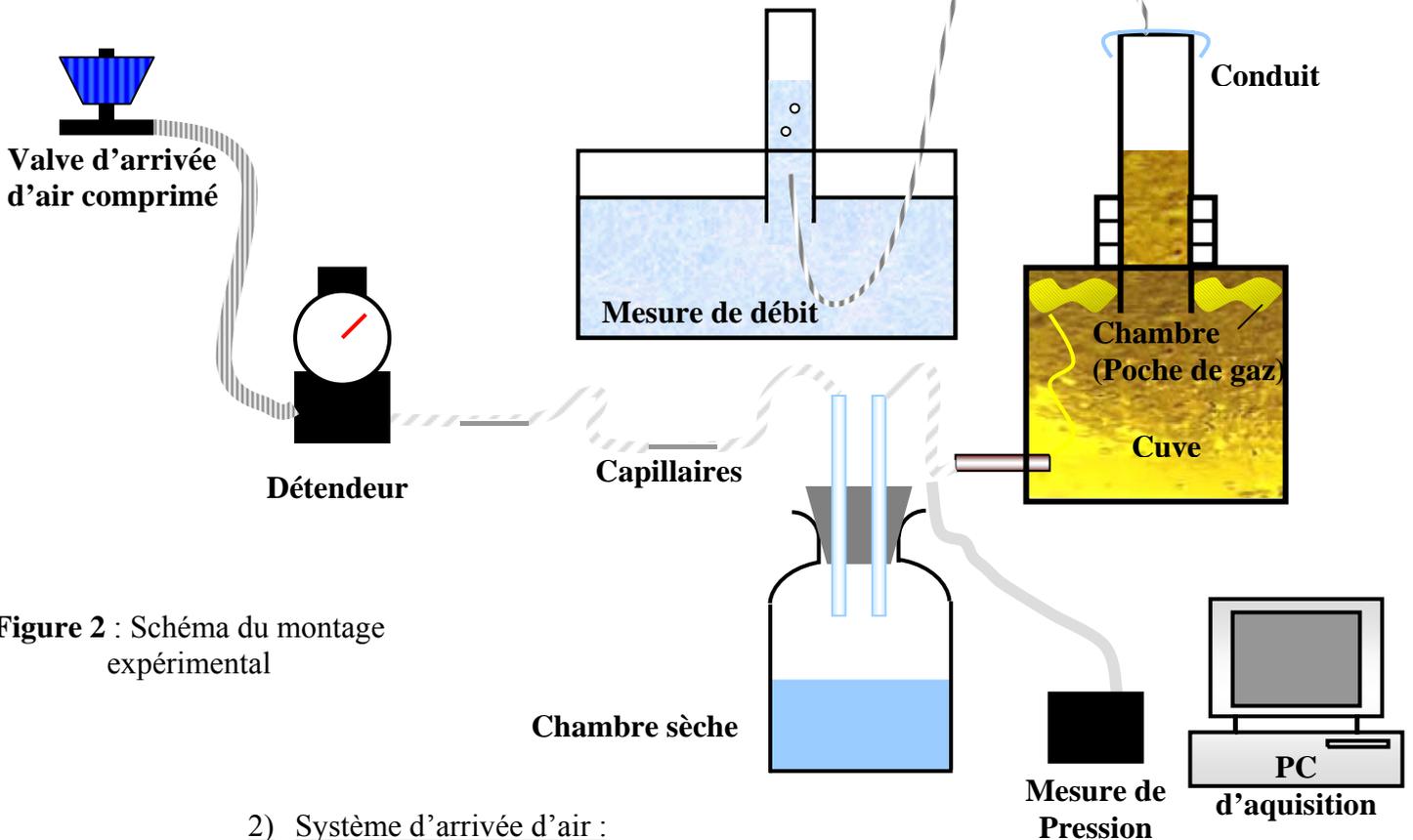


Figure 2 : Schéma du montage expérimental

2) Système d'arrivée d'air :

Les premières heures du montage de cette expérience ont été dédiées à la conception d'un système permettant une alimentation en air constante. Notre source est bien sûr l'air comprimé de l'ENS. Afin d'obtenir des débits faibles et constants, nous avons imposé des pertes de charge grâce à un détendeur, associé à un manomètre, et des capillaires. A une pression dans le détendeur imposée est associée un débit stable à la sortie des capillaires. Nous avons effectué des mesures de débit (et vérifié leur reproductibilité) avec différents capillaires de longueur et de diamètre variables. Finalement, nous avons opté pour une combinaison de deux capillaires permettant d'avoir, à vide, l'ordre de grandeur des débits souhaités ($0,1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$). Enfin, nous avons relié ce système à la cuve et déterminé précisément les débits moyens en sortie pour les différentes pressions imposées (en sortie du détendeur). L'annexe 2 montre notre montage expérimental lors de ces mesures de débits en sortie du système. Pour l'obtention de débits encore plus faibles, nous avons cependant eu recours à l'utilisation d'un débitmètre.

3) Géométrie et nombres sans dimension :

Dans la mesure où nous avons voulu construire un modèle analogique permettant d'expliquer l'apparition de phénomènes discontinus en surface à partir d'un dégazage continu en profondeur, il faut discuter des paramètres choisis.

- La géométrie de notre modèle :

La géométrie est une composante fondamentale. Ce qui est assez intuitif et ce que Jaupart et Vergnolle [1] ont montré, c'est que celle-ci conditionne le stockage d'une certaine quantité de gaz au niveau du toit de la chambre magmatique. Lorsque cette quantité atteint une valeur critique, une très grosse bulle est relarguée dans le conduit, et le gaz peut à nouveau s'accumuler dans la chambre. Les tailles caractéristiques des chambres et des conduits (reliant chambre et surface) sont très variables dans la nature. Cependant, on peut dire que le diamètre du conduit est en général considéré comme négligeable devant sa longueur et devant les dimensions caractéristiques de la chambre. De plus les conduits ont des formes complexes, ils sont en général constitués par des failles, et ne sont donc pas bien représentés par des cylindres. Le but des expériences que nous avons menées n'est pas de respecter ces critères. La géométrie que nous avons adoptée, qui est la géométrie la plus simple communément admise pour représenter un système « volcanique », permet donc uniquement de mettre en évidence un phénomène physique (les effets d'une chambre de stockage). Nous ne prétendons en aucun cas comprendre la dépendance des caractéristiques de ce phénomène (volume critique pour le stockage, fréquence d'émission de bulles dans le conduit) aux tailles ou aux rapports de tailles utilisés.

- Nombres dynamiques sans dimension :

Contrairement à la géométrie qui est très variable dans la nature et donc très difficile à contraindre, il faut pouvoir coller au mieux aux nombres sans dimensions qui caractérisent les écoulements dans ces systèmes. En effet ce sont ces nombres qui caractérisent la balance des forces en jeu et qui permettent de savoir si les phénomènes observés sont comparables aux phénomènes naturels.

Ici nous nous intéressons au déplacement de bulles au sein d'un fluide. Les deux nombres sans dimension principaux à considérer sont le nombre de Reynolds, qui exprime le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses, et le nombre de Weber, qui exprime le rapport entre forces d'inertie et tension de surface. Pour une chambre magmatique, ces nombres s'étendent sur une large gamme : de 1 à 10^3 pour le nombre de Reynolds, et de 10^{-8} à 10^{-2} pour le nombre de Weber (estimations d'après le cours de J.C. Phillips). Dans le cas de notre expérience, le nombre de Weber est de l'ordre de 10^{-5} : il se situe donc dans le bon intervalle. En revanche, le nombre de Reynolds est très inférieur à 1. Encore une fois, nos conclusions ne sont pas directement applicables aux systèmes naturels. Nous étudions un phénomène physique : l'effet du caractère non newtonien du fluide (c'est le cas pour la lave) sur le dégazage, et ce dans un cadre très simple. C'est un point de départ pour l'élaboration de modèles plus complexes qui se rapprocheraient de la réalité.

III) Fluide utilisé

Le fluide non-newtonien que nous avons utilisé est un gel à cheveux de la marque Auchan que nous avons dilué à 20 % d'eau afin d'abaisser un peu sa viscosité. Il s'agit là de l'un des fluides rhéofluidifiants et translucides les moins chers du marché, ce qui est une caractéristique non négligeable étant donné les quantités importantes que requises pour l'expérience (et ses éventuelles reproductions à venir). En contrepartie, les propriétés de ce gel ne sont pas connues. En outre, la quantité variable de bulles (due au piégeage du gaz injecté) est susceptible d'affecter ses propriétés. Nous avons donc effectué des mesures de rhéologie afin de caractériser le comportement du gel et son évolution avec le nombre ou la taille des bulles. Afin d'essayer de comprendre ce comportement, nous avons également mesuré la fraction volumique des bulles dans les gels analysés (en pesant un volume identique de chaque solution et à partir d'un étalon de gel sans bulles), et leurs tailles caractéristiques (observations sous loupe binoculaire et analyses d'images).

1) Mesure de rhéologie :

On introduit donc différentes quantités de bulles dans des échantillons de gel identiques à celui de la cuve, et ce à l'aide d'un fouet manuel ou électrique.

Pour chaque échantillon, on calcule ensuite la fraction volumique de bulles, et le pourcentage surfacique de bulles.

Nous avons utilisé un rhéomètre Bohlin en géométrie plan-plan (Figure 3). Afin d'éviter le glissement aux parois, on les recouvre au préalable de papier de verre.

On réalise des mesures de la viscosité et de la contrainte pour des valeurs du taux de cisaillement régulièrement espacées en échelle log. Pour chaque mesure on impose un taux de cisaillement croissant (trajet aller) puis décroissant (trajet retour) de manière à observer une éventuelle hystérésis.

Nous avons d'abord effectué ces mesures sur le gel dilué à 10% (gel 1) utilisé par T. Divoux [3] dans ses expériences sur colonne. Les résultats sont présentés en figure 4. Suite à un changement des ingrédients composant le gel utilisé, nous avons dû effectuer ces mesures à nouveau (Figure 5). C'est avec ce nouveau gel (gel 2), dilué cette fois à 20 %, que l'expérience a été faite. Les mesures précédentes n'en ont pas pour autant perdu leur importance : la comparaison des deux séries de mesures va permettre de déterminer dans quelle mesure il est possible de comparer les résultats des manipulations de T. Divoux [3] et les nôtres.

Dans les deux cas, la première partie des courbes de viscosité présente un plateau newtonien pour des gradients de vitesse faible, puis au-delà d'un certain seuil, la viscosité chute : il s'agit d'un fluide à seuil et rhéofluidifiant. Le seuil (proche de $0,01 \text{ s}^{-1}$) ne semble pas varier avec la concentration de bulles, c'est une propriété intrinsèque au gel de départ. Notons que la courbe de retour ne se superpose pas à la courbe initiale lorsque l'on repasse sous le seuil. Ceci pourrait être en rapport avec le fait que le cisaillement imposé à l'aller modifie les propriétés du fluide. En effet, le cisaillement provoque la coalescence des bulles qui éclatent en surface : la diminution drastique du nombre de bulles dans les échantillons après la mesure s'observe presque dans tous les cas. D'un point de vue général, le gel 1 dilué à 10% et le gel 2 dilué à 20% montrent des propriétés très similaires : les seuils de gradient de vitesse et les plateaux de viscosité sont du même ordre de grandeur (de l'ordre de 5.10^3 Pa.s pour la viscosité). Au sein d'une même série, les comportements se distinguent par le niveau du plateau de viscosité η : la viscosité baisse à mesure que l'on ajoute des bulles, jusqu'à un seuil critique de quantité de bulles à partir duquel η remonte à nouveau (Figure 6). Ce seuil peut-être franchi à l'aide d'un fouet manuel (ce qui est le cas de l'échantillon ech4 pour le gel 2 à 20%) comme à l'aide d'un batteur électrique (échantillon batteur 2 pour le gel 1 à 10%).

Au-delà du seuil les courbes sont quasiment identiques (il existe un biais expérimental pour le gel 1), ce qui est certainement lié à la coalescence et à la disparition d'un grand nombre de bulles.

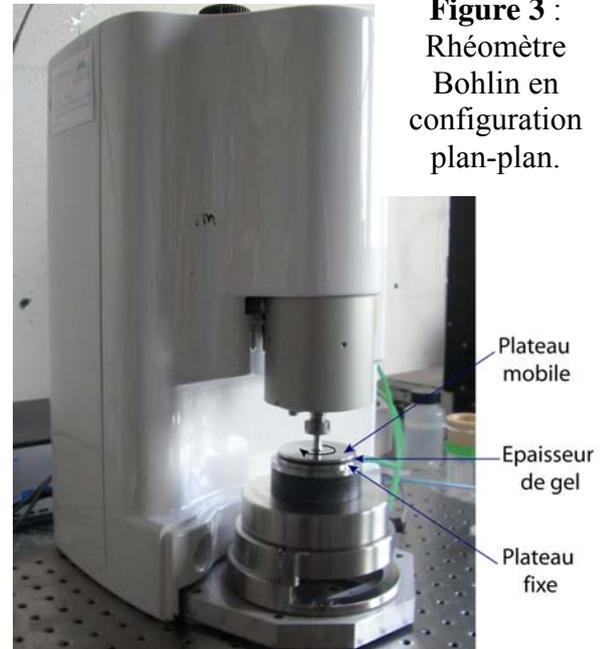


Figure 4 : Graphes de la viscosité (Pa.s) et de la contrainte (Pa) en fonction du taux de cisaillement (s^{-1}) pour les échantillons préparés à partir du gel 1.

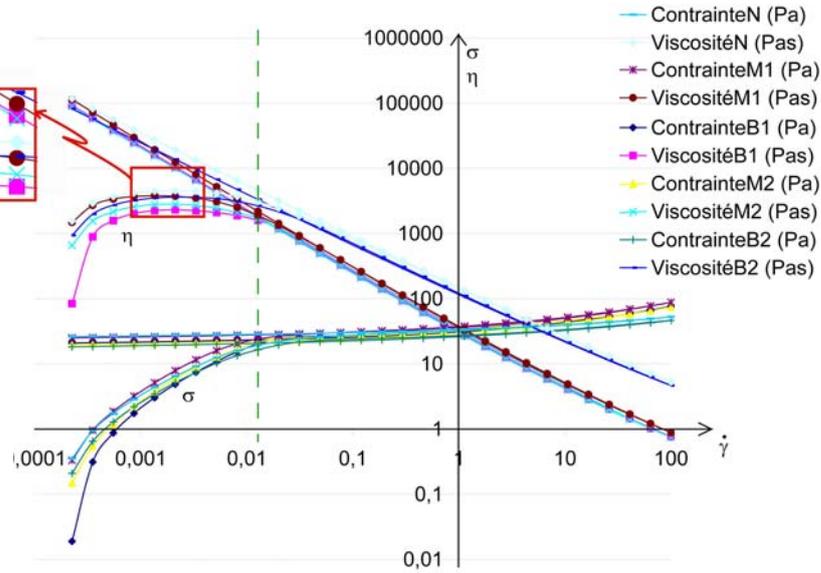
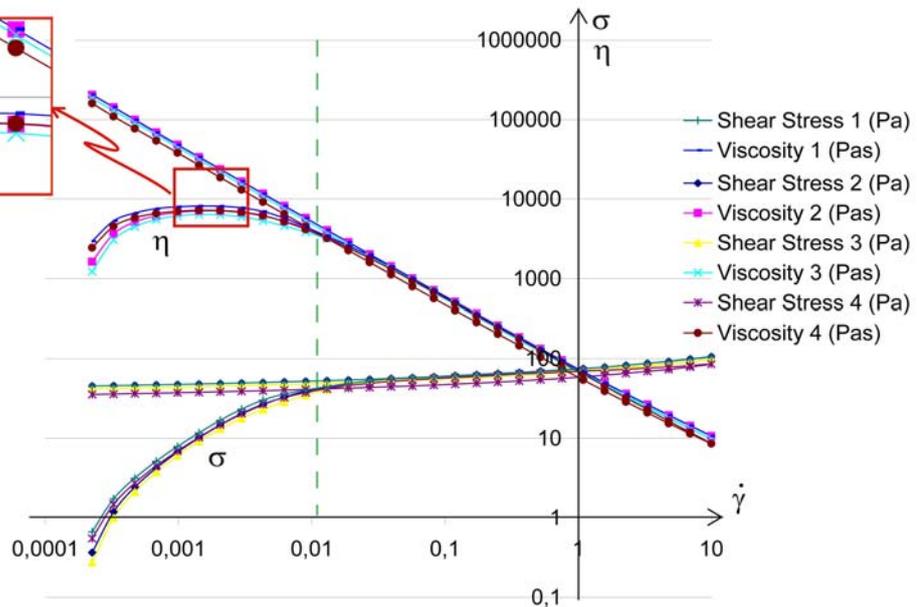


Figure 5 : Graphes de la viscosité (Pa.s) et de la contrainte(Pa) en fonction du taux de cisaillement (s^{-1}) pour les échantillons préparés à partir du gel 2.



La proportion ou la taille des bulles introduites modifie donc le comportement du fluide de manière complexe. C'est ce que nous allons essayer de comprendre, au moins qualitativement, dans le paragraphe suivant.

2) Calcul de la proportion surfacique de bulles et rayon moyen des bulles :

- Proportion surfacique :

Il s'agit de placer entre lame et lamelle une petite quantité de l'échantillon à étudier en appuyant pour faire en sorte qu'aucune bulle ne se superpose. Si l'on considère que les bulles et le gel fluent de la même manière, alors les rapports surfaciques de bulles et de gel sont conservés lorsqu'on applique une pression sur la lamelle.

Sur le fond de chaque lamelle, on a pu placer des grilles identiques qui permettent de donner l'échelle du cliché et de faciliter le comptage des bulles.

Nous avons écrit un programme MatLab permettant de relever le diamètre de toutes les bulles sur un nombre de carreaux donnés, et de calculer le rapport de surface des bulles sur la surface du gel. Un exemple d'image traitée est donné en annexe 4.

- Statistique sur les rayons des bulles :

On veut caractériser les bulles du gel par leur rayon. Pour cela, on réalise le même protocole que précédemment sans exercer une pression sur la lamelle qui pourrait déformer les bulles.

Un second programme matlab réalise quelques statistiques à partir de ces résultats.

Il permet de relever les diamètres des bulles d'un échantillon de gel. Il donne en retour le rayon moyen des bulles et calcule la fonction de répartition de la variable R qui à tout rayon associe la proportion de bulles ayant un rayon inférieur.

Une façon d'accéder au rayon caractéristique des bulles pourrait être de tracer l'histogramme des abondances. Cependant les résultats peuvent être biaisés par la largeur des barres, et par les intervalles choisis (d'autant que les échantillons sur lesquels on travaille sont relativement petits). Une façon de s'affranchir de ces biais de comptage est donc justement de s'intéresser à la fonction de répartition.

Nous avons réalisé un fit exponentiel de ces courbes qui nous a permis de déduire une échelle caractéristique de la taille des bulles : $F(R < r) \propto \exp(-r/r_0)$ avec r_0 le rayon caractéristique des bulles (cf. Table 1). Un exemple de fonction obtenue et son fit sont donnés en annexe 3.

Blower et al. [4] ont étudié la distribution des tailles des bulles dans les roches volcaniques. Ils montrent qu'une distribution exponentielle est caractéristique d'un matériau dans lequel a eu lieu un petit nombre d'épisodes de nucléation. Chaque épisode de nucléation correspond à un événement explosif. Au fur et à mesure que le nombre de ces événements augmente, la distribution tend vers une loi de puissance. C'est le résultat d'une compétition entre rapidité de la diffusion et nucléation de bulles dans le fluide qui est désormais hors équilibre.

Lorsque nous battons les échantillons à la main ou au batteur électrique nous obtenons systématiquement une fonction de répartition exponentielle dans le gel. Bien que ce ne soit pas un phénomène de diffusion du gaz et de nucléation qui soit à l'origine de la formation des bulles dans le gel, il peut être intéressant de voir que l'on part d'un matériel qui est analogue à un magma n'ayant subi encore que peu d'explosions.

Les deux séries d'analyse que nous avons réalisées sur deux gels de compositions différentes semblent montrer un comportement rhéologique analogue. On observe en fait deux tendances. Dans un premier temps la viscosité du gel dans lequel on introduit des bulles semble diminuer. Lorsque l'on dépasse un rapport seuil pourtant et pour des préparations de type mousse, la viscosité semble réaugmenter sans toutefois atteindre les valeurs du gel initial sans bulle.

On peut essayer d'interpréter ces résultats :

Il est probable que pour des faibles concentrations, la compressibilité plus élevée de l'air par rapport au gel confère aux bulles un rôle lubrifiant, d'où la diminution de la viscosité moyenne. En revanche, lorsque la concentration de bulles devient importante, on a affaire à une mousse dont la structure est stable et relativement difficile à déformer puisque les bulles doivent se contourner et glisser les unes sur les autres lorsque le gel est cisailé. Cet effet serait donc responsable d'une augmentation de la viscosité.

Plus les tailles moyennes de bulles introduites sont petites, plus le rapport seuil devrait donc correspondre à des proportions volumiques de bulles importantes. C'est ce que l'on semble

observer dans le cas du gel 1, où les proportions importantes de bulles sont introduites à l'aide d'un batteur électrique (cf. . Table 1).

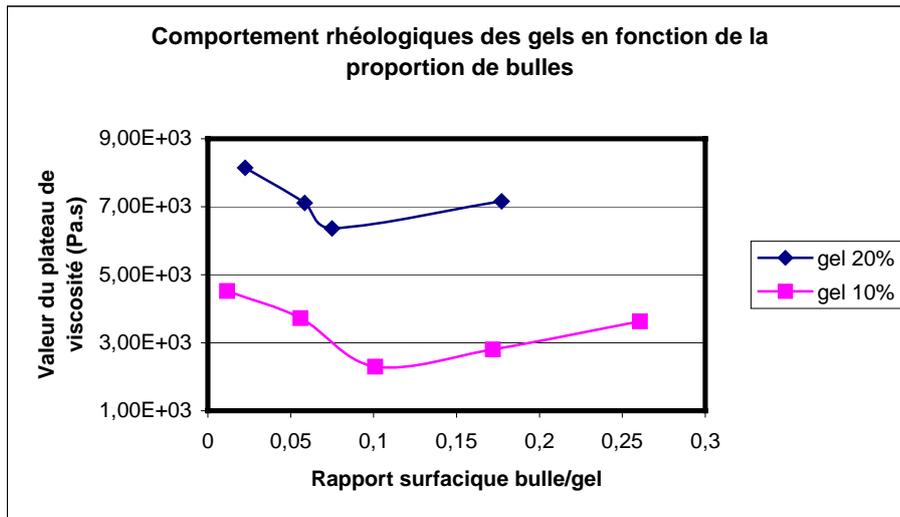


Figure 6

échantillon	Rapport surfacique (%)	R médian (mm)	r moyen (mm)	plateau de viscosité (Pa.s)
Gel 2 - 1	2,2	0,21	0,25	8,15E+03
Gel 2 - 2	5,8	0,17	0,22	7,11E+03
Gel 2 - 3	7,5	0,15	0,17	6,36E+03
Gel 2 - 4	17,7	0,08	0,1	7,16E+03
Gel 1 - normal	1,2	0,12	0,21	4,52E+03
Gel 1 - main1	5,6	0,20	0,22	3,72E+03
Gel 1 - batteur1	10,1	0,19	0,24	2,30E+03
Gel 1 - main2	17,2	0,18	0,19	2,80E+03
Gel 1 - batteur2	26,1	0,13	0,15	3,63E+03

Table 1 : Synthèse des caractéristiques des gels réalisés pour les expériences de rhéologie. Les rayons sont obtenus avec le programme MatLab.

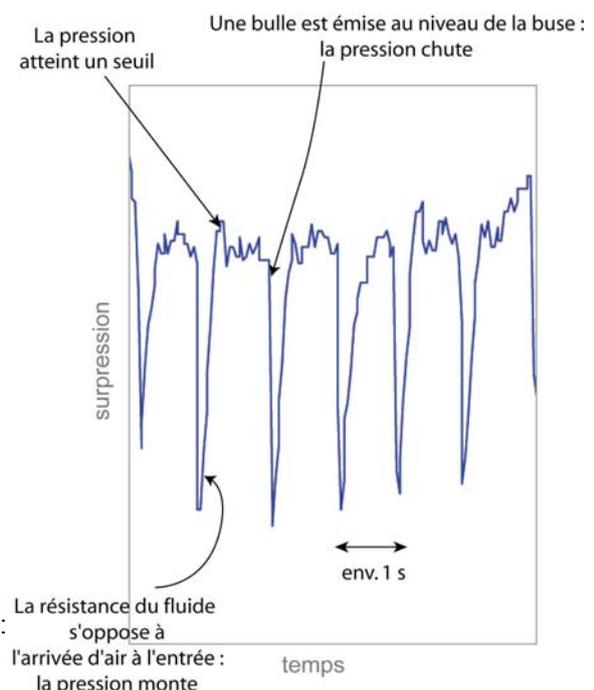
IV) Caractérisation des différents régimes de dégazage

1) Mesures de pression :

Divoux et al. [3] ont précédemment montré l'existence de deux régimes pour le dégazage à travers une colonne de fluide complexe : un régime « bulles » et un régime « canal ouvert » (voir Introduction). Le régime bulle est caractérisé par des oscillations de pression pseudopériodiques et de forte amplitude alors que le régime canal correspond à une surpression nulle (chambre connectée à l'extérieur via le canal).

Dans nos mesures de pression, et une fois passé le régime transitoire, nous observons également ces deux types de régimes. Le premier est caractérisé par des oscillations

Figure 7 : détail du signal de pression montrant des oscillations périodiques associées au régime bulles (entre buse et chambre) – débit : $0,03 \text{ L.min}^{-1}$



crénelées (fig. 7) de forte amplitude, et de pseudopériode (obtenue par transformé de Fourier) 1,2 s.

Ce régime possède les caractéristiques du régime « bulle » décrit par Divoux et al. [3]. De plus c'est approximativement la période que l'on observe pour l'émission de bulles entre la buse et la poche de gaz. Notons que nous n'avons pas observé de dépendance de cette période au débit imposé.

Le reste du signal dont les variations sont de moindre amplitude (4 fois plus faible) correspond semble-t-il au régime canal ouvert entre la buse et la poche. En effet, l'ouverture d'un canal empêche l'apparition d'importantes surpressions entre la buse et la poche. Ceci correspond bien aux observations que l'on a pu faire pendant les manipulations.

Mais ce signal, contrairement à celui que l'on observe dans une colonne, présente des oscillations basse fréquence et d'amplitudes faibles.

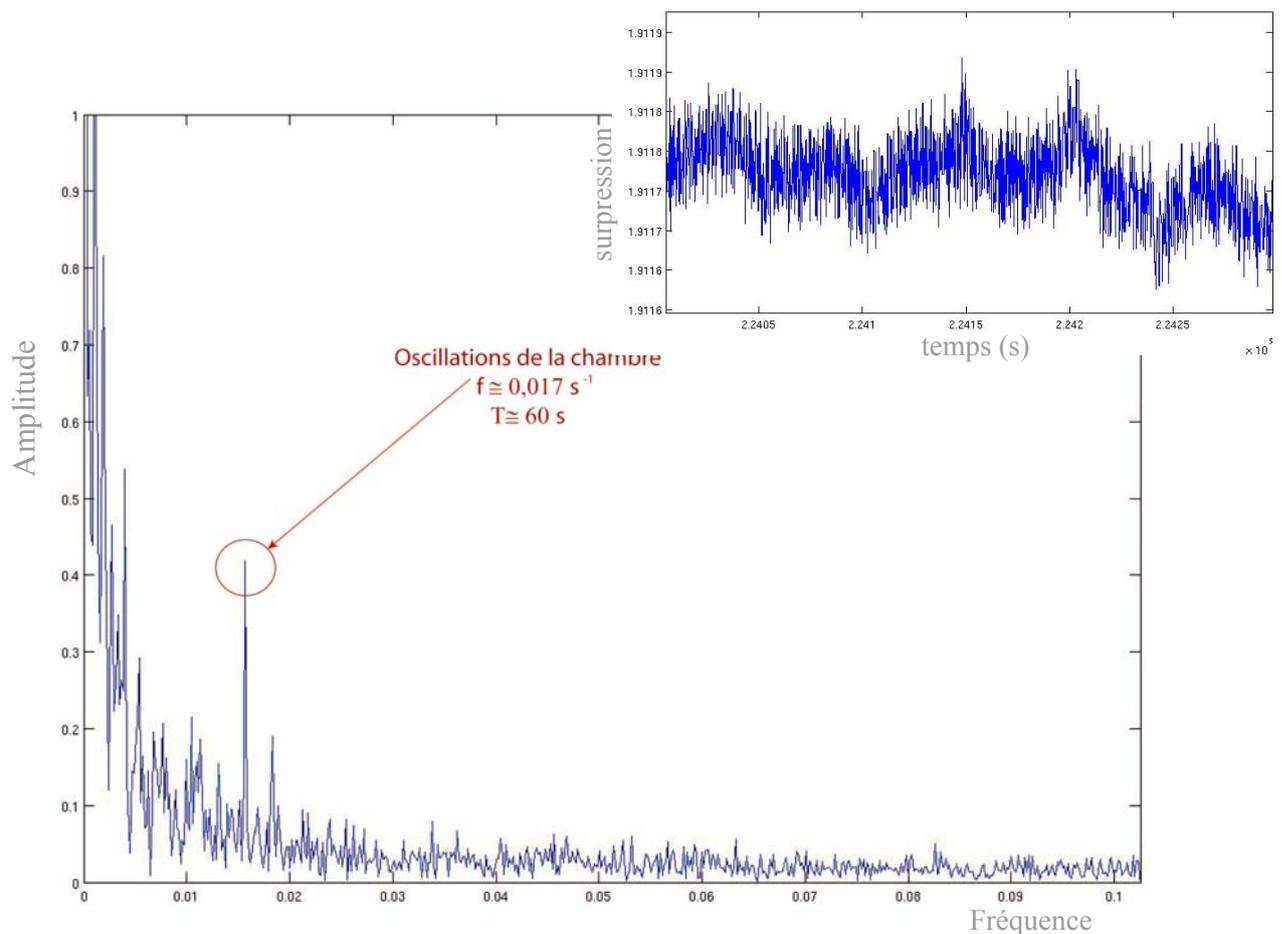
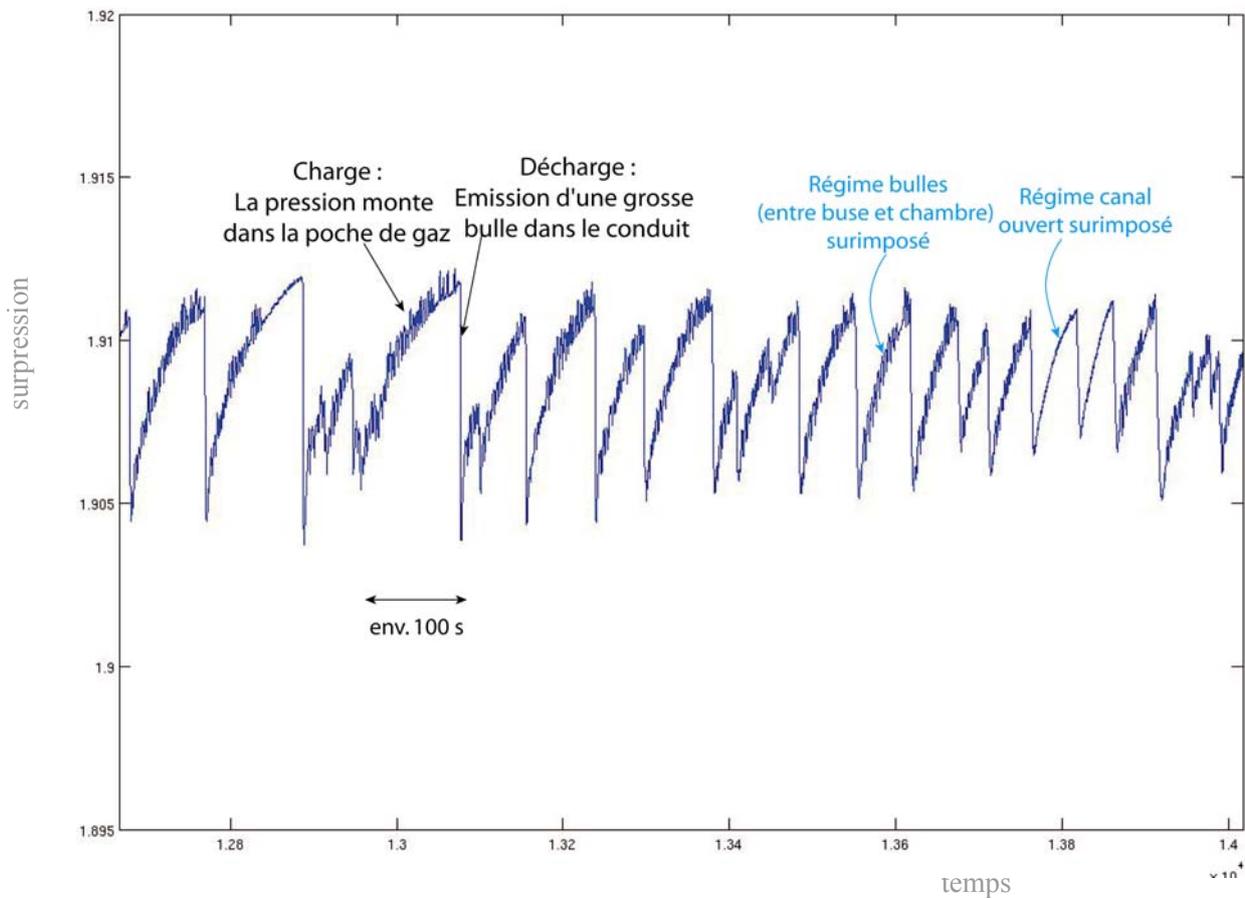


Figure 8 : En haut, extrait du signal pour un débit $0,3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ montrant l'existence d'une pseudo-période de 50 s. En bas, cette pseudo-période est mise en évidence par la transformée de Fourier du signal.

La pseudopériode bien visible dans la transformée de Fourier de ce signal, est d'environ 50 s et elle ne dépend pas du débit imposé. Elle doit donc être contrainte par la géométrie de la chambre. Elle pourrait correspondre aux « battements » de la chambre par fluage lent du gel sur les parois (comportement élastique). C'est ce qui peut expliquer que l'on ne trouve pas ces oscillations dans une colonne dont le volume de chambre sèche est fixe. Il faudrait bien sûr tester cette hypothèse en modifiant le volume de la chambre, en modifiant la position du conduit notamment.

Pour les faibles débits ($0,1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) et parfois pour des débits intermédiaires, on retrouve ces deux régimes surimposés à des profils de charge et décharge (Fig. 9). La période de ces chages-décharges est très variable, de 30 à 100 s et les variations d'amplitudes 3 à 4 fois plus importantes que dans le régime bulle décrit précédemment. Ce régime ne s'observe pas dans la colonne. L'hypothèse la plus probable est qu'il s'agisse de l'émission de grandes bulles dans le conduit. Au fur et à mesure de l'injection de gaz dans la poche, la pression augmente jusqu'à devenir suffisante pour qu'une bulle se forme et s'échappe dans le conduit, entraînant une dépressurisation intense et brutale (équivalent d'un « stick-slip motion »).

Figure 9 : Extrait du signal de pression pour un débit imposé de $0,01 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$



2) Importance des différents régimes en fonction des débits imposés :

Ces régimes alternent et leur importance relative dépend du débit imposé.

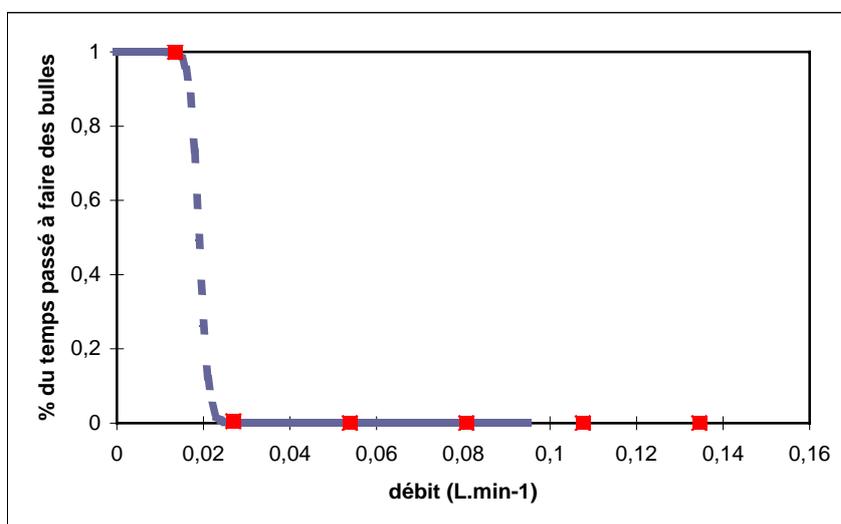
- Pour des débits allant de $0,5$ à $0,1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, le signal et les observations montrent un régime de canal ouvert entre la buse et la chambre et entre la chambre et le conduit.
- Pour des débits allant de $0,1$ à $0,03 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, on a une intermittence entre régimes « canal ouvert » et « bulles ». Cependant le régime bulle ne représente qu'une faible fraction de l'enregistrement. Il semble que ce régime de durée variable apparaisse un peu aléatoirement, mais il serait intéressant de mener des études de distribution pour voir s'il existe un temps caractéristique.

- Enfin pour le débit de $0,01 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, l'ensemble du signal correspond à une émission de bulles au niveau de la buse et dans le conduit. Il semble que l'émission de bulles au niveau de la buse favorise l'émission de bulles dans le conduit.

La période de charge/décharge est la même que celle des battements de la chambre, ce qui peut expliquer qu'on ne retrouve pas le signal caractéristique du battement de la chambre aux plus faibles débits.

D'un point de vue géologique, on s'intéresse avant tout à ce qui se passe entre la chambre et la surface en fonction du débit. Nous avons reporté dans le graphe (Figure 10) suivant le temps passé à faire des bulles dans le conduit (régime charge/décharge) en fonction du débit imposé. Il semble que l'on passe brutalement d'un régime de dégazage continu (canal ouvert) à un dégazage discontinu (grosses bulles dans le conduit). Il faudrait réaliser d'autres mesures dans l'intervalle $[0,01 ; 0,03] \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ au sein duquel il existe une intermittence entre ces deux régimes (malgré un débit constant à la base du système).

Figure 10 : Pourcentage du temps passé par le système en régimes bulles isolées dans le conduit.



3) Hystérésis :

Puisque l'on est parti initialement d'une chambre qui n'était pas formée, et dont le volume a augmenté au cours du temps, on veut savoir s'il diminuerait de nouveau quand on augmente la pression (et si il est fonction du débit) ou si il ne serait pas modifié (la formation de la poche serait dans ce cas un phénomène transitoire). Pour cela, après avoir effectué les mesures en diminuant la pression par palier, on les a réalisées de nouveau en l'augmentant. On n'obtient aucune différence ni dans le contenu du signal de pression, ni dans le volume de la chambre. Il n'y a donc pas d'hystérésis et le système peut-être considéré comme en régime permanent.

Conclusion et Perspectives :

L'analyse de la surpression dans le système étudié a montré l'existence de plusieurs modes de dégazage : les régimes bulles et canal ouvert dans le conduit ou entre la buse et la chambre peuvent se combiner. On a mis en évidence l'existence des battements d'une

chambre élastique et l'importance de la dynamique de cette chambre. C'est peut-être elle qui impose la période d'émission des bulles dans le conduit.

Jaupart et Vergnolle ont obtenu différents modes de dégazage en faisant varier la viscosité des fluides qu'ils utilisaient. C'est un paramètre que nous avons maintenu constant dans cette étude. Les différents régimes que l'on a mis en évidence ici résultent de la variation des débits de gaz que l'on impose. De plus pour un même débit, différents régimes peuvent être observés.

La lave étant un fluide non-newtonien, ces résultats sont particulièrement intéressants pour comprendre les observations sur le terrain. Un changement de régime en surface ne correspond pas forcément à un changement de régime en profondeur. Plus particulièrement, l'intermittence des phénomènes de surface n'est pas non plus nécessairement liée à une intermittence du régime profond.

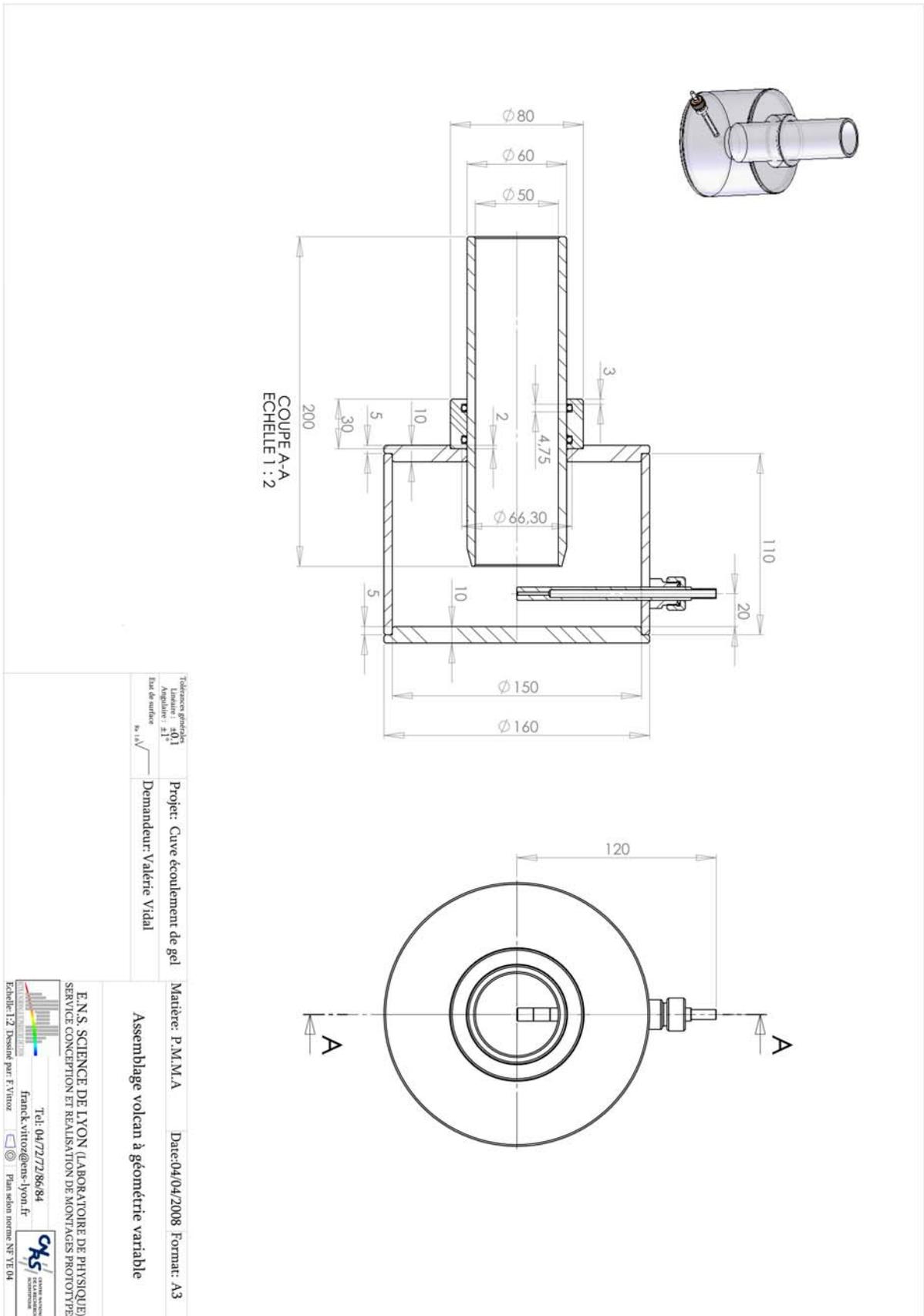
Bien sûr, comme nous l'avons dit précédemment, notre modèle est encore loin des systèmes volcaniques réels. Des expériences ultérieures, plus complexes, pourraient peut-être permettre de tendre vers des modèles ou des géométries plus réalistes. Enfin, il serait sans doute intéressant de prendre en compte l'influence d'autres paramètres sur le dégazage au travers d'un fluide non-newtonien, comme la température. Ce paramètre est particulièrement important, puisque le gradient thermique qui s'établit dans le conduit d'un système volcanique, peut modifier les propriétés de la lave entre la profondeur et la surface.

Bibliographie :

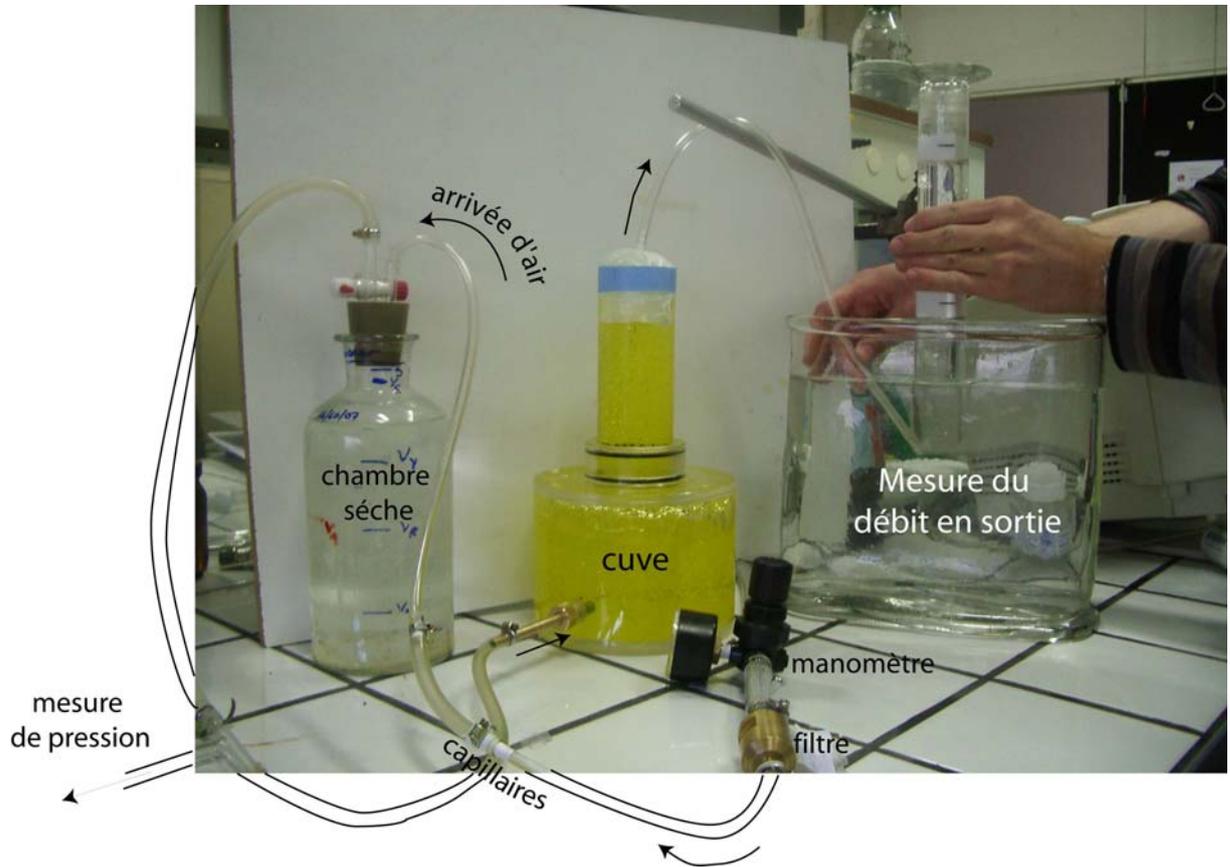
- [1] C. Jaupart & S. Vergnolle, Laboratory models of Hawaiian and Strombolian eruptions, *Nature* 331, 58-60 (1988).
- [2] C. Jaupart, Physical models of volcanic eruptions, *Chem. Geol.* 128, 217-227 (1996).
- [3] T. Divoux et al., Dégazage intermittent à travers une colonne de fluide complexe, *Compte-Rendus de la 11^e Rencontre du Non-Linéaire*, 31-36 (2008).
- [4] Blower et al., Inferring volcanic degassing processes from vesicle size distribution, *Geophys. Res. Lett.* 28, 347-350 (2001).

Avant tout, merci à Valérie Vidal de nous avoir si bien accueilli au sein du Laboratoire de Physique de l'ENS, d'avoir pris le temps de nous accompagner au cours de ces expériences et d'avoir montré tant de motivation et d'implication au sein de ce projet. Nous voudrions également remercier Thibaut Divoux, qui fort de son expérience, nous a prodigué une aide et des conseils précieux dans la réalisation de nos manips ; et merci à Eric Freyssingeas pour les discussions fructueuses. Enfin, nous aimerions dire un merci général à tout le laboratoire de physique ainsi qu'aux techniciens de l'atelier.

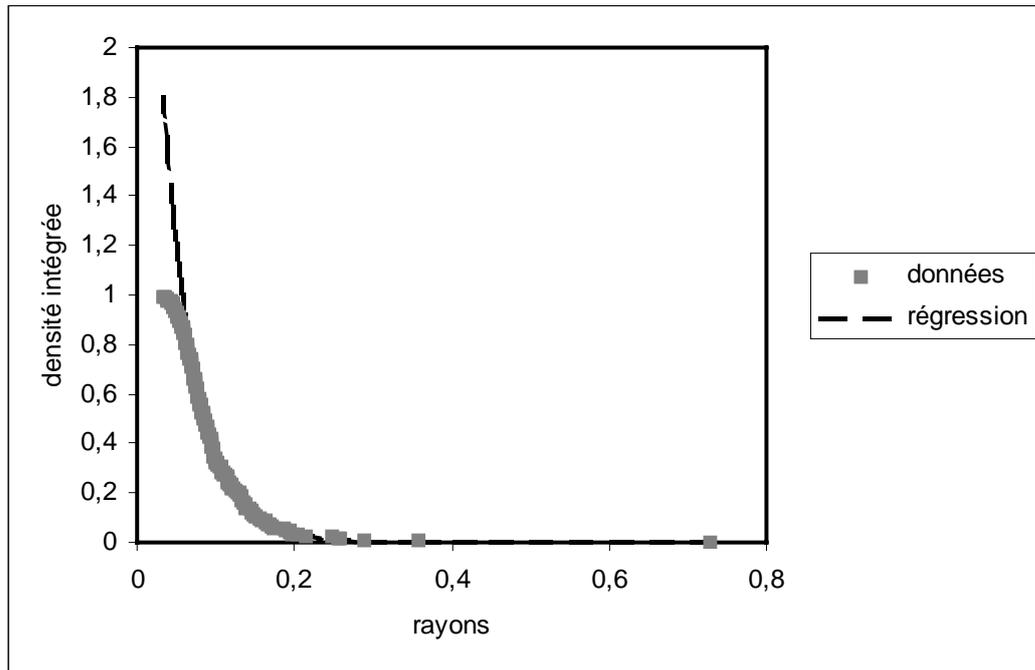
Annexe 1 : Schéma technique du système.



Annexe 2 : Montage expérimental et mesure du débit en sortie.



Annexe 3 : Courbe de probabilité cumulée pour les rayons de bulles de l'échantillon éch 4 (gel 2)



On peut noter un désaccord entre les données et le fit exponentiel pour les plus petits rayons. Cependant il est probable qu'il puisse être issu d'un biais de comptage puisque l'on s'approche des limites de résolution (de l'image ou de l'utilisateur du programme Matlab).

Annexe 4 : Exemple d'image traitée avec le programme Matlab calculant la proportion surfacique de bulles (gel 2 - ech4).

