LP2I Lycée Pilote Innovant International

Histoire de se faire mousser

FONDATION CGENIAL

Sciences à l'École

Projet présenté par

BROSSARD	Léa
GUIGNARD	Lou-Ann
ROBIN	Juliette

Résumé

Lorsqu'avec le culot d'une bouteille de boisson gazeuse ouverte, on vient percuter le goulot d'une autre bouteille de boisson gazeuse également ouverte, la bouteille du dessous mousse de façon impressionnante, alors que celle du dessus semble complètement indifférente au traumatisme subit par celle du dessous : elle ne mousse pas.

Pourquoi ? Quel phénomène explique la formation de mousse dans la bouteille du dessous, et quelle différence peut expliquer le comportement de la bière dans les deux bouteilles ?

C'est ce que nous avons cherché à savoir au cours de notre projet, dans lequel il nous a fallu observer, proposer des hypothèses, tenter de les vérifier de manière expérimentale. La réponse se trouve dans une onde issue du coup donné… Mais quel type d'onde, et quel chemin prend-elle ? La réponse se trouve dans ce mémoire et est illustrée dans des vidéos qui l'agrémentent.

Lien vers la vidéo du projet : https://www.dailymotion.com/video/x7437th

Sommaire :

I - Introduction :

II - Approche qualitative, ou…. Donner des coups sans compter.

III – Comment varie la pression au sein du liquide lors du choc ?

IV – Comment interpréter les variations de pression observées ?

V - Comment une surpression peut provoquer l'apparition de bulles ?

VI – Une autre explication envisageable ?

VII – Que peut-on apprendre de plus de nos expériences ?

I - Introduction :

Une des farces, pas toujours très amusantes cela dit, que l'on peut faire, consiste à agiter une bouteille d'eau gazeuse avant que quelqu'un d'autre ne l'ouvre. L'effet voulu par les uns, et maudit par d'autres a pour conséquence de devoir nettoyer la zone dans laquelle s'est déroulée l'expérience.

Ce phénomène se passe aussi lorsque l'on tape une bouteille d'eau gazeuse déjà ouverte sur une autre, elle-même ouverte. Certains le font avec des bouteilles de bière, ce qui conduit alors à faire mousser la bière, comme vous pouvez le voir dans l'expérience que nous avons réalisée ci-dessous, avec de la bière sans alcool (figure 1),

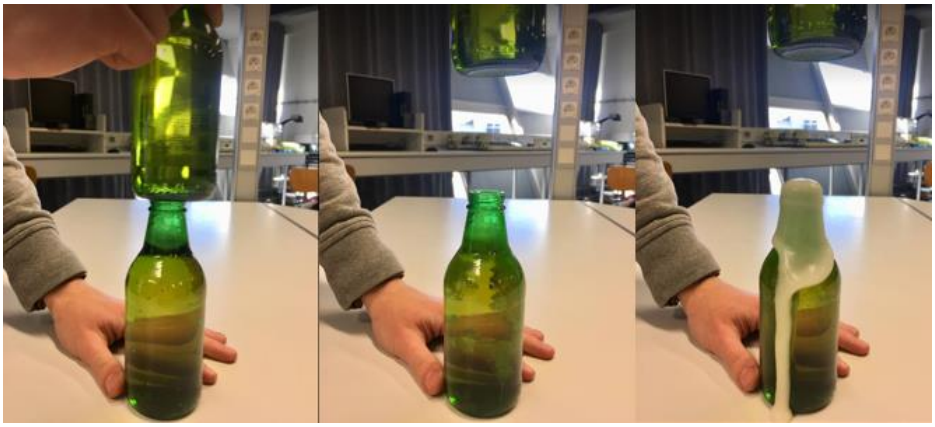


Figure 1 : *Choc entre 2 bouteilles de bière : c'est celle du dessous qui mousse !*

Mais lors de cette expérience, il y a tout de même quelque chose d'intrigant. En effet, une quantité très importante de mousse est apparue dans la bouteille du dessous, alors que très peu de mousse s'est formée dans la bouteille du dessus. Comment expliquer une telle différence ?

C'est ce que nous avons cherché à comprendre au cours de notre projet.

Nous avons réalisé dans un premier temps quelques expériences qualitatives, pour essayer notamment de trouver des pistes de réflexion. Puis nous avons pu être plus précis dans nos recherches, comme vous le lirez au cours de ce mémoire.

II - Approche qualitative, ou…. Donner des coups sans compter.

D'un point de vue mécanique, le fait de taper A sur B fait que dans le référentiel de A, c'est comme si c'était B qui venait se projeter sur A. Si A et B sont alors percutées par un coup de même force, comment se fait-il que la formation de mousse dans les deux bouteilles ne soit pas le même ?

1) Plaçons nous au niveau des surfaces en contact lors du choc

Un premier réflexe nous amène tout naturellement à considérer le fait que les surfaces des 2 bouteilles en contact lors du coup n'ont pas la même forme puisque la bouteille du dessous reçoit le coup sur son goulot, alors que celle du dessus le reçoit sur son culot. Que se passerait-il si on faisait l'inverse ? Pour le savoir, nous avons découpé le culot d'une bouteille, tout en gardant son bouchon fermé, nous l'avons retournée et nous l'avons remplie de bière (figure 2). Nous avons disposé une languette de bois sur la surface ouverte, que nous avons solidement scotchée pour qu'elle ne bouge

Figure 2 : dans cette situation, c'est toujours dans la bouteille du dessous que l'on observe de la mousse se former !

pas. Nous avons alors percuté la bouteille du dessous, par l'intermédiaire de la languette en bois, à l'aide d'une autre bouteille également coupée au niveau de son culot, et également remplie de bière, comme le montre la figure 2.
L'expérience montre à nouveau que c'est dans la bouteille du dessous que se forme une grande quantité de mousse, alors que quasiment rien d'exceptionnel ne se passe dans la bouteille du dessus. Cette première expérience tend à nous faire dire que les surfaces mises en contact lors du choc ne semblent pas être à l'origine du phénomène observé.

Une autre différence évidente entre les deux bouteilles manipulées dans l'expérience décrite en introduction, c'est que celle du dessus reçoit le choc sur son culot, qui est une surface fermée, alors que celle du dessous le reçoit sur l'anneau du goulot, donc sur une surface ouverte. Autrement dit, en tapant la bouteille du dessous, on fait forcément rentrer de l'air par le goulot de la bouteille du dessous, contrairement à ce qui se passe avec la bouteille du dessus. Est-ce là la clé du mystère ? Est-ce que l'air au-dessus du liquide par exemple joue un rôle quant à la formation des bulles au moment de l'impact ? Il ne semble pas, car le phénomène se produit encore, même si on remplit la bouteille à ras bord. Alors comment expliquer la différence en termes de formation de mousse, entre la bouteille du haut et celle du bas ? Pour tenter de répondre à cette question, nous avons voulu savoir où se forment les bulles exactement …

2) Où se forment les bulles exactement ?

Pour tenter d'y voir plus clair et de comprendre le phénomène à l'origine de la formation de la mousse, nous avons décidé dans un premier temps de voir exactement à quel endroit la mousse se forme au moment du coup donné, et nous avons essayé de voir si cet endroit dépendait de la force du coup porté sur la bouteille.

a – Le dispositif expérimental :

Il nous a alors fallu concevoir un dispositif relativement simple permettant de faire des mesures répétitives, notamment en termes de force du coup donné sur la bouteille. Nous avons alors opté pour le système suivant (figure 3) : un morceau de bois relativement lourd peut pivoter grâce à un roulement à billes, autour d'un axe le traversant à l'une de ses extrémités. Une règle permet de fixer la hauteur de départ du morceau de bois. Nous faisons en sorte que le morceau de bois, au moment de l'impact, se trouve dans une position horizontale, de sorte que toute la surface du goulot soit percutée. La chute du morceau de bois est commandée par un électroaimant.

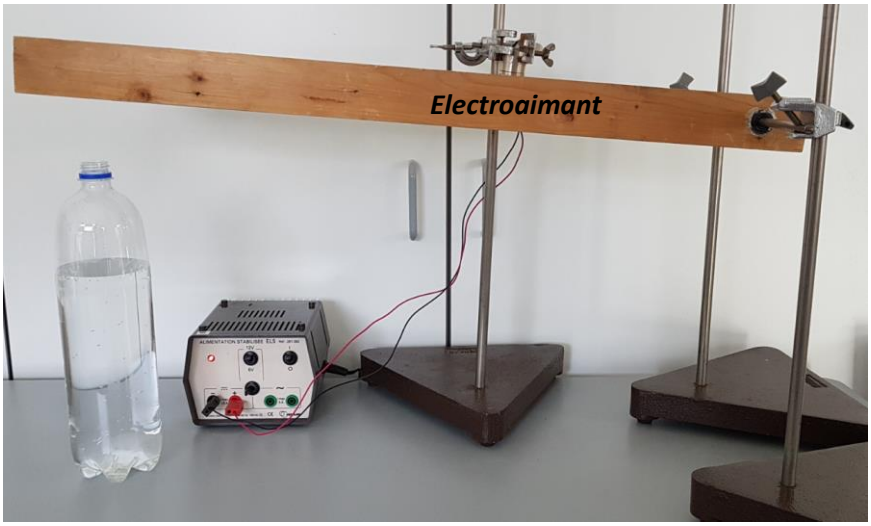


Figure 3 *– Dispositif expérimental permettant de contrôler la force du coup porté sur la bouteille.*

Qu'avons-nous alors observé ?

b – Résultats expérimentaux :

Si le morceau de bois ne tombe pas de suffisamment haut, le phénomène ne se produit pas. Il semble donc exister une limite au phénomène observé.

Par contre, passé cette limite, une relation entre la hauteur du morceau de bois au départ du coup et l'endroit où se forment les bulles n'est pas évidente à mettre en place. Il n'est pas certain qu'il y en ait une. Seule la quantité de bulles formées semble différente.

Voici quelques images recueillies pour différentes hauteurs de chutes sur des bouteilles de limonade. Nous avons utilisé une caméra filmant à 240 images par seconde (Figure 4).

Figure 4 :

Quelques images obtenues en tapant sur une bouteille de limonade. Les bulles se forment en bas, à partir de points très localisés, grossissent en montant et deviennent de plus en plus nombreuses. Les bulles au-dessus semblent provenir simplement du remous à la surface du liquide provoqués par le coup. C'est lorsque les bulles du dessous remontent en nombre que le débordement de mousse se produit.

Contrairement à ce que l'on peut croire en observant ces photos, les bulles partent généralement du bord de la bouteille. Il nous a fallu, pour nous en convaincre, utiliser 2 caméras visant la bouteille, et placées à 90° l'une par rapport à l'autre.

Mais contrairement à ce que l'on peut observer dans une coupe de champagne, dans laquelle les bulles partent aussi de quelques points du verre, de façon à former de simples filets de bulles, les bulles qui apparaissent dans la bouteille au moment du choc sont formées en masse. Elles sont aussi plus petites dans le cas de la bouteille violentée que dans le cas d'une même bouteille de boisson gazeuse que l'on ouvre simplement sans lui avoir tapée dessus auparavant. En tous cas, comme les bulles partent du bas, cela semble confirmer que le phénomène n'est probablement pas lié à l'air situé au-dessus du liquide dans la bouteille.

3) Que pouvons-nous alors supposer à ce stade du projet ?

Faisons le point : Dans les expériences décrites ci-dessus, on voit que l'on arrive à dégazer la boisson gazeuse en donnant un coup sur la bouteille. Mais il existe d'autres façons de dégazer la boisson : en chauffant ou en agitant la boisson par exemple. Bref, pour dégazer la boisson, il faut forcément avoir une action sur le liquide. Lorsque l'on tape sur la bouteille, quelle action est communiquée au liquide ? Nous avons dit plus haut que cette action n'est pas transmise par l'air. Elle doit donc l'être par la bouteille. Nous avons pensé en quelques sortes que le coup porté sur la bouteille engendrait une secousse qui se répercuterait dans le liquide.

Mais si les bulles se forment en bas de la bouteille, cela veut-il dire que le liquide ressent uniquement cette secousse en bas ?

Pour tester cette hypothèse, nous avons décidé d'analyser le liquide contenu dans la bouteille au moment de l'impact. Nous nous sommes dit que la pression du liquide devait être particulièrement intéressante à suivre. Est-ce que la pression varie ? Et s'il y a variation, est-ce la même en tout point du liquide ?

III – Comment varie la pression au sein du liquide lors du choc ?

1) Dispositif expérimental :

Pour répondre à ces questions, nous avons choisi de relever l'évolution de la pression à différentes hauteurs de liquide contenu dans la bouteille d'eau gazeuse au moment de l'impact. Nous avons alors percé une bouteille plastique à trois hauteurs différentes (figure 5), et nous avons introduit des tuyaux reliés à des capteurs de pression, eux-mêmes reliés à une carte d'acquisition. Comme nous voulions faire plusieurs expériences et que notre stock de boisson gazeuse était épuisé, nous avons décidé d'investir dans une machine fabriquant de l'eau gazeuse. Une fois le gaz introduit dans la bouteille livrée avec la machine, nous versions l'eau gazeuse dans notre bouteille plastique percée de trois trous. Comme nous voulions que nos expériences puissent être comparées les unes avec les autres, nous nous sommes assurés que la quantité de gaz injecté dans la bouteille d'eau était relativement identique à chaque fois.

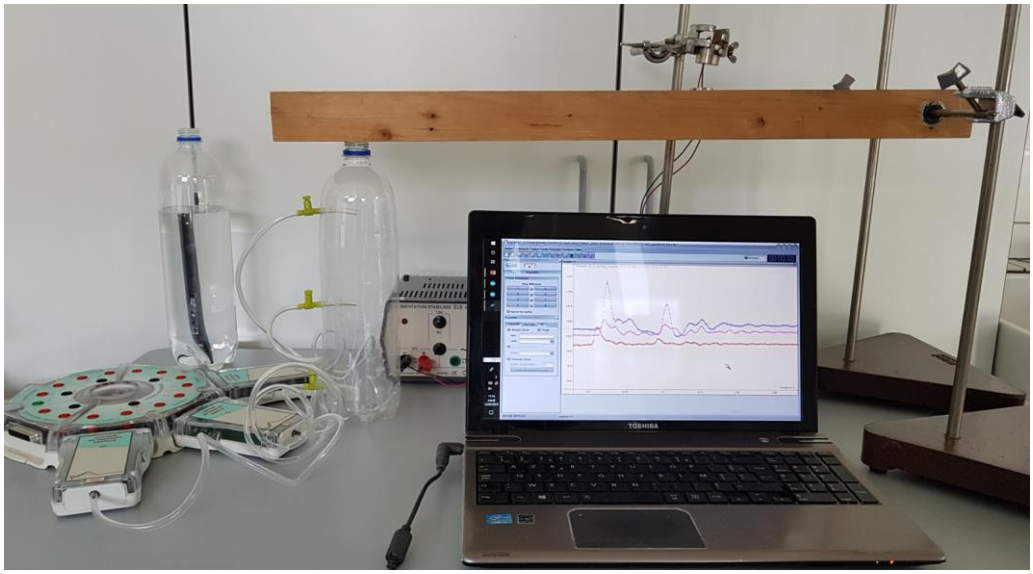
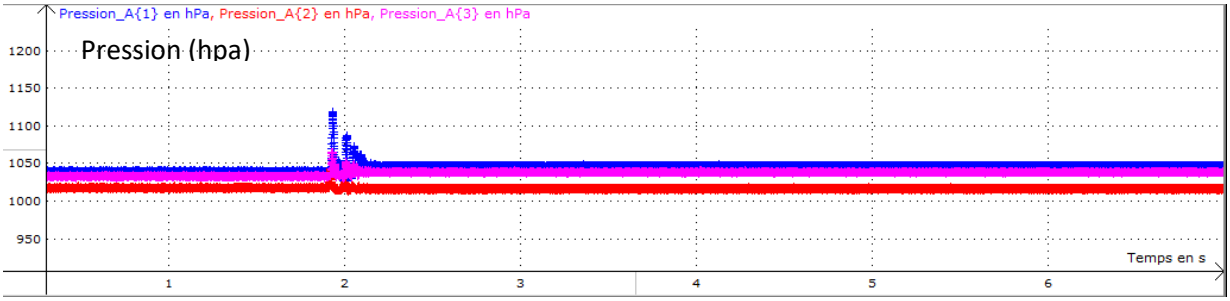


Figure 5 *– Mesure de l'évolution de la pression à trois hauteurs différentes dans le liquide*

Nous disposons donc d'une bouteille qui au départ contient à chaque fois le même volume d'eau gazeuse, et cette eau gazeuse contient à chaque fois le même volume de gaz. Nous avons suivi l'évolution de la pression selon trois hauteurs différentes au cours du temps, après avoir donné un coup sur la bouteille dont nous avons retiré préalablement le bouchon. Nous avons également, fait varier l'intensité du coup porté sur le goulot de la bouteille.

2) Résultats expérimentaux :

Nous espérions voir quelque chose se passer, et les résultats obtenus ont été à la hauteur de nos attentes ! Les voici : (figure 6)



Et en zoomant sur la partie intéressante :

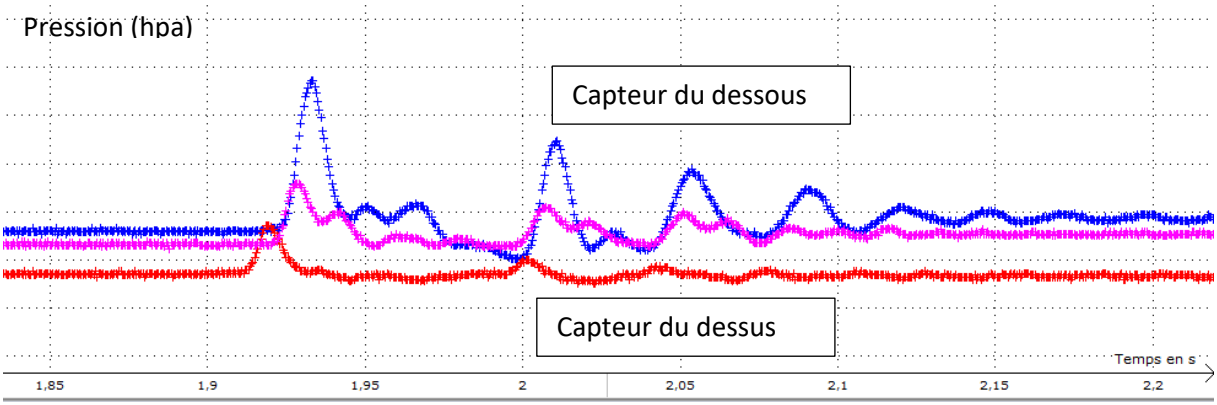


Figure 6 : *évolution des pressions dans la bouteille à la suite du coup donné sur le goulot*

Les résultats confirment alors que la perturbation portée sur le goulot de la bouteille est transmise au liquide. Cela se traduit, comme on le voit, par une surpression dans le liquide. Et logiquement, cette surpression arrive d'abord sur le capteur situé en haut de la bouteille (courbe rouge), puis arrive sur le capteur du milieu, et enfin sur le capteur situé au fond de la bouteille (courbe bleue). Sur la figure ci-dessus, on relève une surpression de 8.10^3 Pa.

Mais avant de passer à l'analyse de ces résultats expérimentaux, nous devons prendre des précautions : se peut-il qu'en réalité, lorsque l'on tape sur la bouteille, le niveau du liquide soit perturbé, ce qui perturberait momentanément la pression dans le liquide aux différentes profondeurs ? Ou bien est ce que l'extrémité des tuyaux dans la bouteille, au moment de l'impact, bouge ou pivote selon une direction verticale ?

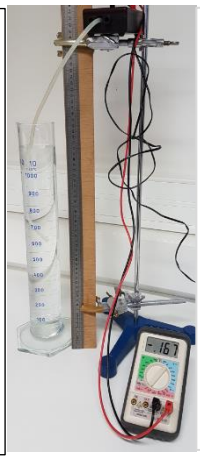
3) Les variations de pression observées sont-elles significatives ?

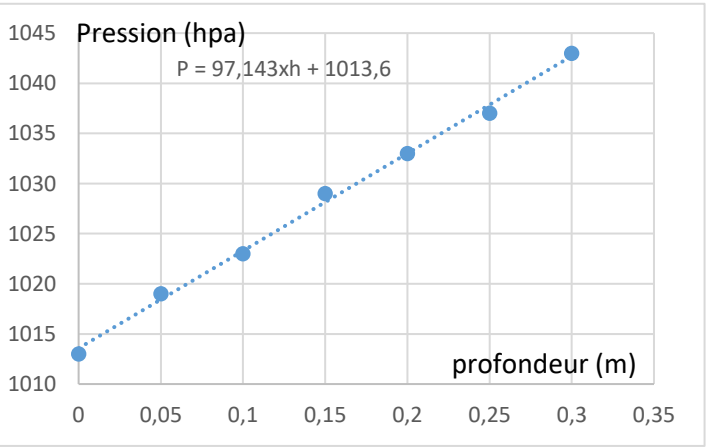
Pour répondre à ces questions, nous avons mesuré l'évolution des pressions lors d'une expérience au cours de laquelle nous avons simplement fait vaciller la bouteille autour de sa position verticale, sans porter de coup. Nous avons alors remarqué que le fait que la hauteur de la surface de l'eau dans la bouteille varie sur uniquement quelques centimètres ne provoquait pas une variation de pression clairement mesurable. Pour compléter et confirmer ce résultat, nous avons voulu savoir quelle devrait être la variation du niveau de la surface de l'eau par rapport aux tuyaux reliés aux capteurs pour que cette variation provoque une élévation de la pression de l'ordre de 8.10^3 Pa.

Pour cela, nous avons mesuré la pression en fonction de la profondeur, dans une éprouvette remplie d'eau, et nous avons trouvé les résultats ci-dessous (figure 7):

Figure 7 :

Expérience permettant la mesure de la pression en fonction de la profondeur dans l'eau.





En considérant alors ce modèle, nous pouvons en déduire qu'il faudrait que la distance entre la surface de l'eau et le tuyau du dessous soit égale à 82 cm au-dessus du niveau d'eau avant l'impact ! Ce qui n'est bien entendu pas le cas, puisque la bouteille ne mesure que 30 cm.

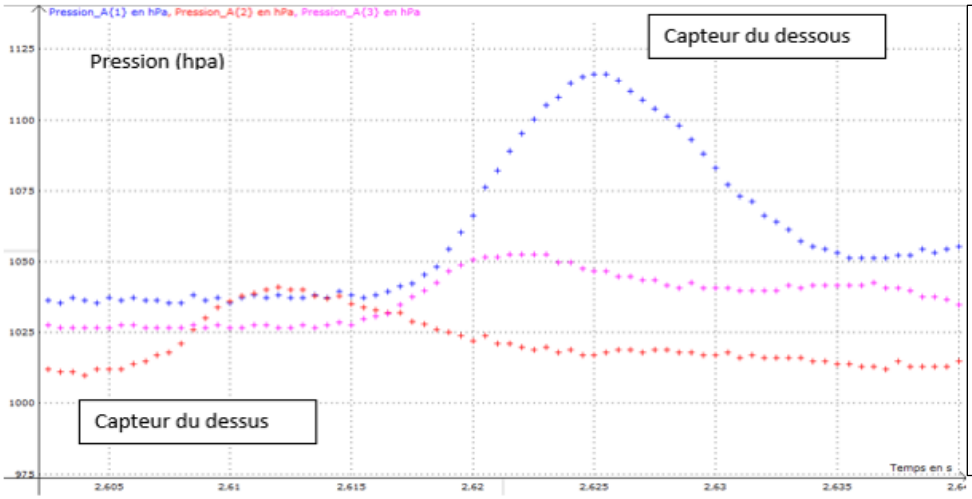
Cette expérience est finalement intéressante, car elle permet de nous rendre compte que la surpression dans le liquide est vraiment importante puisque la valeur atteinte reviendrait à rajouter 82 cm de liquide au-dessus des 30 cm de liquide déjà présents dans la bouteille !

Puisque les courbes obtenues figure 6 sont bien liées au coup donné, nous avons essayé de les exploiter au maximum :

IV – Comment interpréter les variations de pression observées ?

Nous avons dans un premier temps cherché à déterminer à quelle vitesse la surpression se déplace dans le liquide :

1) Vitesse du déplacement de la surpression dans le liquide :



A l'aide des trois courbes obtenues à chaque mesure, il nous a été possible de calculer la vitesse à laquelle la surpression se déplace dans le liquide (figure 8) :
La surpression est à la date t = 1,919 s au niveau du capteur du haut, puis 1,933 s au niveau du bas. Ces deux capteurs sont éloignés d'une distance de 30 cm. On en déduit la célérité :

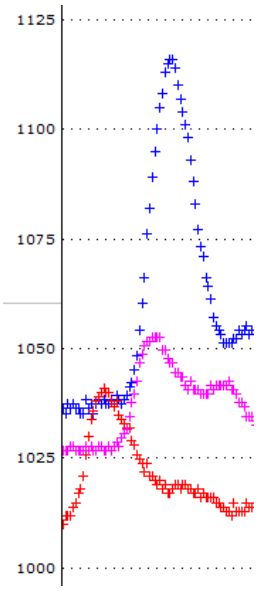
$$v = \frac{0{,}30}{1{,}933 - 1{,}919} = 21 m/s$$

Figure 8 : décalage dans le temps des surpressions au niveau des trois capteurs

La valeur trouvée nous a semblé très grande dans un premier temps, mais finalement, pas tant que ça, et on peut même dire qu'elle est très faible au regard de la célérité des ondes acoustiques dans l'eau qui est de l'ordre de 1500 m/s. Cette remarque ouvre d'ailleurs sur une nouvelle perception des choses : il semble probable que le déplacement de la surpression soit dû à une déformation de la bouteille qui se déplace de haut en bas. La vitesse trouvée est en effet plus en adéquation avec une onde de déformation (onde de flexion) de la bouteille qu'une onde de compression.

Poursuivons l'analyse des courbes.

2) Evolution de la surpression en fonction de la profondeur :



On constate que, alors que les deux capteurs (en haut et au milieu de la bouteille) de pression voient une surpression quasiment identique d'environ 2800 Pa, la variation de la pression au niveau du capteur du bas se trouve aux alentours de 8000 Pa, comme nous le voyons sur cette nouvelle acquisition présentée ici (figure 9):
Il y a donc vraiment quelque chose de particulier qui se déroule au niveau du culot de la bouteille en termes de pression. Cette observation est particulièrement intéressante puisque l'on sait que les bulles se forment justement au fond de la bouteille.
D'autre part, on voit bien que les capteurs enregistrent une surpression. C'est intéressant de le souligner car l'origine de la formation des bulles est ici engendrée par une surpression (qui n'est pas suivie d'une dépression), alors que les bulles qui apparaissent à l'ouverture d'une bouteille d'eau gazeuse sont créées par une dépression.

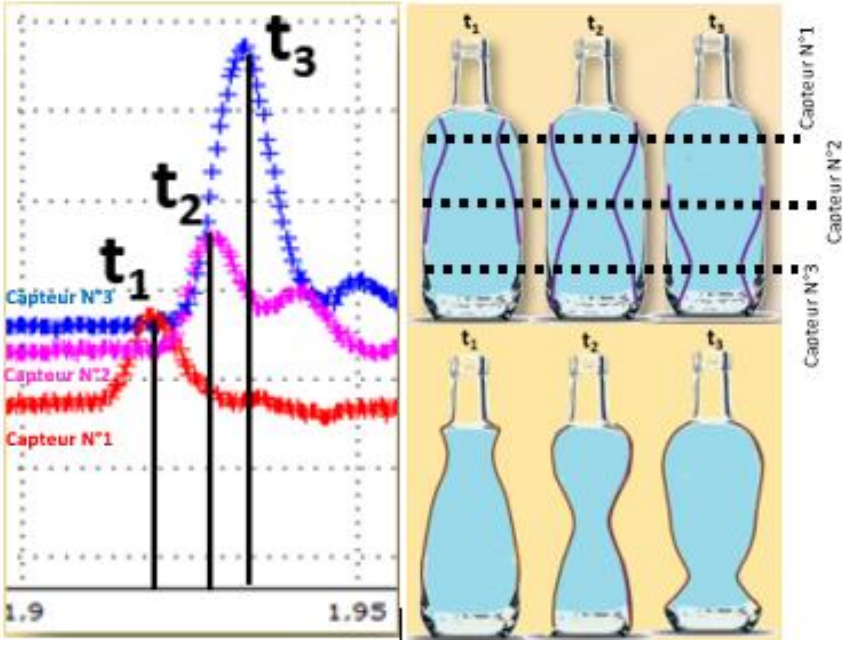
Pourquoi la surpression est plus forte en bas de la bouteille ?

Nous pensons que c'est dû au fait que lorsque l'on tape sur la bouteille, la déformation de la bouteille se déplacerait alors vers le bas. Mais arrivé en bas de la bouteille, comme celle-ci est fermée du côté du culot, le liquide serait davantage comprimé en cet endroit que dans le reste du

Figure 9 : Surpression en fonction de la profondeur

liquide. Pour mieux s'en rendre compte, on a tenté de représenter la déformation de la bouteille au cours du temps, à l'aide des résultats expérimentaux que nous avons obtenus :

Puisque l'on voit que la perturbation dure environ 14 ms, et comme on sait que la vitesse à laquelle elle se délace est d'environ 21 m/s, on en déduit qu'elle s'étale sur une distance d'environ 30 cm, c'est-à-dire pratiquement toute la hauteur de la bouteille.



Ainsi, (voir figure 10) lorsque le maximum de la surpression est au niveau du capteur N°1, la perturbation commence à peine à atteindre le capteur N°2. Et quand le maximum de la surpression est au niveau du capteur N°2, la perturbation finit à peine de perturber l'eau au niveau du capteur N°1, et attaque le capteur N°3. On peut alors représenter l'allure de la bouteille aux trois instants t_1, t_2 et t_3 :

Cette représentation permet de mieux envisager le fait que lorsque l'onde de flexion arrive en bas de la bouteille, l'eau se retrouve alors comprimée, de façon plus importante que ce qui se passe au niveau des capteurs 1 et 2.

Figure 10 : *à gauche : dates des surpressions maximales au niveau des 3 capteurs de pression – A droite, allure de la bouteille aux 3 dates en question.*

Mais alors, si notre interprétation est bonne, si on tape la bouteille par le dessous, on ne devrait pas voir de surpression au niveau du tuyau du haut ? Et bien vérifions cela !

3) Evolution de la pression en tapant la bouteille par le dessous :

a) Résultats expérimentaux :

Lorsqu'on tape le culot de la bouteille, en regardant attentivement le liquide contenu dans la bouteille, nous pouvons voir qu'un peu de bulles se forme en haut de la bouteille ainsi qu'en bas, même si cela est sans comparaison avec ce qu'on observe lorsqu'on tape sur le goulot. Concernant les évolutions des pressions, nous mesurons un pic de pression en bas de la bouteille (courbe rouge), mais également un pic en haut de la bouteille (courbe rose), alors que la pression au milieu ne varie que très peu (figure 11).

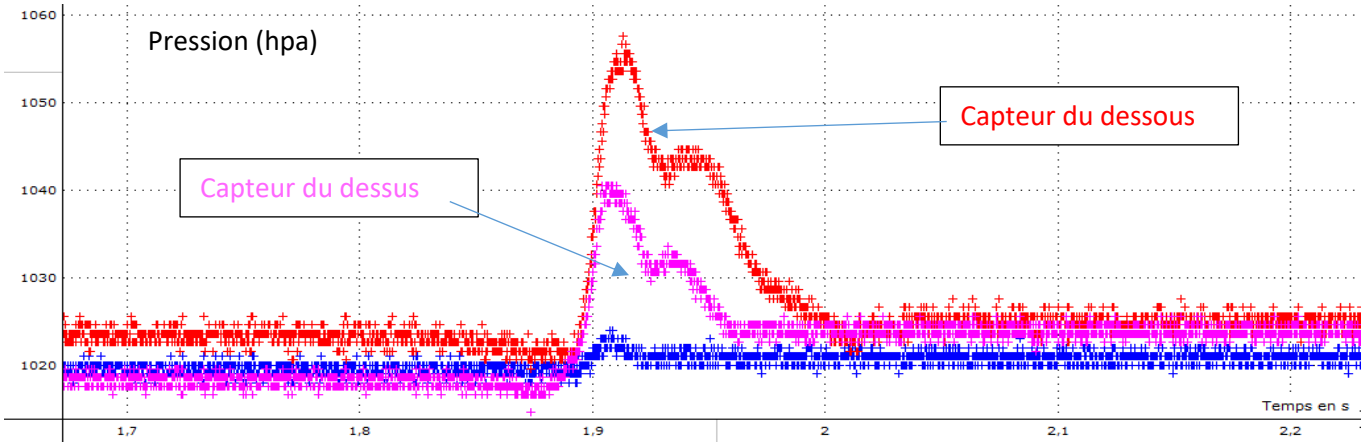


Figure 11 : *coup porté sur le dessous de la bouteille : surpressions sur les capteurs du bas (rouge) et du haut (rose)*

b) Interprétation :

Puisque les bulles apparaissent là où les surpressions sont significatives, cela nous pousse à confirmer le lien entre surpression et formation de bulles.

Mais le pic de pression observé au niveau du tuyau du dessus remet en cause notre hypothèse, puisqu'on s'attendait à ne pas le voir.

Peut-être que cela est dû à la forme effilée de la bouteille du côté du goulot. En tapant sur la bouteille du côté du culot, l'onde de choc serait alors à son tour bloquée en arrivant côté goulot, ce qui engendrerait une contrainte mécanique sur le liquide, responsable de la surpression observée côté goulot.

A-t-on moyen de vérifier certaines hypothèses que nous venons de formuler ?

Oui. Peut-être qu'en coupant le haut de la bouteille, on peut vérifier si le pic de pression observé en tapant la bouteille par le dessous disparaît….

c) Vérification de l'hypothèse :

Voici la bouteille sacrifiée… figure 12

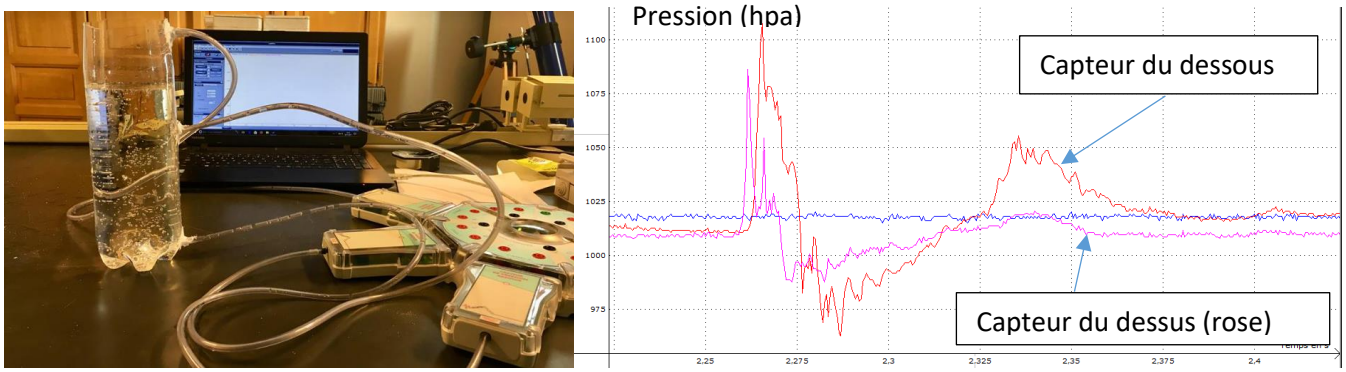


Figure 12 : *Bouteille coupée en haut et tapée sur le dessous. A droite, suivi de la pression.*

Le pic de pression de gauche est produit par le fait qu'on presse la bouteille lorsqu'on la prend dans les mains. Puis les pressions diminuent car la bouteille est projetée vers le bas : on la cogne sur la table. Et au moment du choc, on observe bien une surpression, mais uniquement sur le capteur en bas de la bouteille. Celui du milieu ne ressent presque rien. (Et le capteur du dessus n'est pas dans l'eau pour cette expérience). Cela confirme donc que la surpression observée en haut, suivi d'une formation de bulles, est due à la forme du haut de la bouteille.
Pourtant, ces bulles formées resteront en nombre limité, et aucun débordement ne sera observé en tapant la bouteille par le dessous. Et c'est bien ce qu'on observe dans le cas des 2 bouteilles tapées l'une sur l'autre : celle du dessus ne mousse pratiquement pas.

4) Conclusion sur cette première partie :

La surpression obtenue en bas de la bouteille en tapant sur le goulot est plus grande que celle obtenue en haut de la bouteille tapée sur son culot. Cela peut-être la raison pour laquelle il y a plus de bulles formées dans la bouteille du dessous que dans la bouteille du dessus. D'autre part, les bulles formées en partie basse du liquide arrivent en haut avec de la vitesse. Et durant leur ascension, on observe qu'elles grossissent, et on a l'impression que sur leur chemin, elles provoquent la formation d'autres bulles. Tout ceci ne peut par contre pas être engendré par des bulles qui se forment directement sur le niveau supérieur de la bouteille. A ce stade du projet, nous pensions donc que cela expliquait nos observations, et la différence de comportement entre les bouteilles du dessus et du dessous.

Nous avançons donc dans la compréhension du phénomène…. Mais une autre question se pose : comment une surpression peut provoquer l'apparition de bulles ?

V – Comment une surpression peut provoquer l'apparition de bulles ?

1) Une histoire de nucléation :

Des discussions avec Nadine Candoni, professeur chercheur au CINAM, Centre Interdisciplinaire en Nanoscience de Marseille, nous ont amené à considérer une possible analogie avec la formation d'un cristal :

Lorsque l'on forme un cristal à partir d'une substance dissoute en solution, le cristal croît à partir d'un germe qui peut apparaître au sein de la solution pour des raisons multiples. Soit le solvant s'évapore, rendant la solution plus concentrée, soit des vibrations aident le processus, ou encore, la présence d'impuretés peut favoriser cette germination. Dans tous les cas, ces différentes raisons font que les entités se rapprocheront les unes des autres, ce qui leur permettra de s'agglomérer pour donner naissance au cristal.

De la même manière, avant de taper sur la bouteille, les molécules de CO_2 sont dissoutes dans le liquide. Elles y sont donc présentes sous forme aqueuse et non gazeuse. Mais elles peuvent se regrouper au cours d'un processus appelé nucléation. Tant que le gaz est dissout dans le liquide, si on ne tape pas ou qu'on n'agite pas la bouteille, seules quelques bulles apparaissent au contact du verre, probablement à cause d'impuretés du verre. Ce sont généralement des bulles de grosses tailles, qui finissent par se décrocher de la paroi de la bouteille lorsque la poussée d'Archimède le leurs permet. Ces bulles grossissent par nucléation des molécules de gaz dissoutes. Mais lorsqu'on tape sur la bouteille, la surpression du liquide doit forcer les molécules à davantage se rencontrer, pour se regrouper et former une quantité phénoménale de microbulles de gaz. Et ceci se produit rapidement. Peut-être que c'est justement du fait de la rapidité de cette nucléation que, comme pour la cristallisation, les bulles formées en tapant sur la bouteille soient de plus petites tailles. En effet, nous avons pu lire que si les cristaux se forment rapidement, ils seront de plus petites tailles que si on laisse la cristallisation se faire sur un temps plus long.

Compte tenu de tout cela, il est alors tout à fait cohérent d'observer que la majorité des bulles apparaissent au fond de la bouteille, puisque c'est là que la surpression engendrée par le coup donné est la plus forte, et ce doit donc être là aussi que la nucléation de molécules des gaz dissoutes est la plus probable.

Selon le raisonnement que l'on vient de faire, la nucléation des molécules de CO_2 lors de la surpression est permise car les molécules de CO_2 sont davantage concentrées. Nous avons voulu estimer de combien la surpression pouvait rapprocher les molécules de CO_2 dissoutes.

2) Peut-on évaluer la distance entre 2 molécules de CO_2 lors de la surpression ?

Une question nous est venue en tête. Nous avons supposé que la nucléation des bulles de gaz est provoquée par un rapprochement des molécules de CO_2 les unes par rapport aux autres. Peut-on connaître la distance intermoléculaire entre les molécules de CO_2 dissoutes dans le liquide avant le coup donné ? Peut-on ensuite avoir une idée quantitative de cette nouvelle distance lors de la surpression dans le liquide ? Il doit forcément exister une relation qui permette de calculer la variation du volume de liquide à la surpression observée…

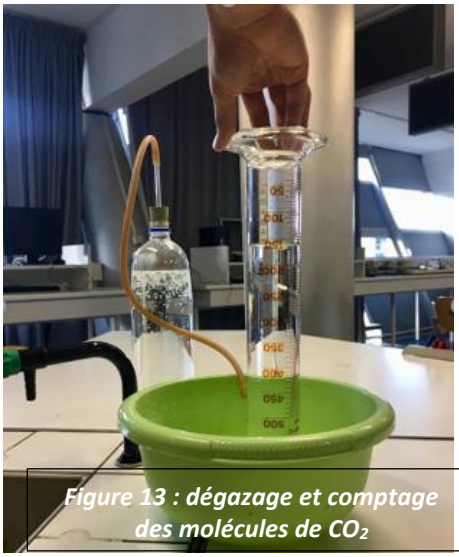


Figure 13 : dégazage et comptage des molécules de CO_2

- **Calcul de la distance entre 2 molécules de CO_2 dissoutes avant le coup :**

Pour faire ce calcul, il a fallu connaître la quantité de gaz dissout dans le liquide. La machine Sodastream ne nous permet pas de connaître directement cette valeur. Et le mode de fonctionnement de cette machine ne nous permet pas de déterminer cette quantité directement.

Nous avons alors réalisé l'expérience suivante pour arriver à nos fins :

Nous avons relié la bouteille à un bouchon muni d'un tuyau débouchant sur une éprouvette préalablement remplie d'eau et retournée dans une bassine d'eau (figure 13). Le gaz dégagé alors de la boisson gazeuse chasse l'eau de l'éprouvette, et nous pouvons alors mesurer le volume de gaz ainsi obtenu.

Nous avons mesuré un volume de CO_2 dégagé de 1,2 L

Connaissant le volume de gaz, et en admettant qu'aux pressions auxquelles on se trouve, on peut l'assimiler à un gaz parfait, on peut alors remonter au nombre de mole de gaz contenu dans la bouteille avec la relation :

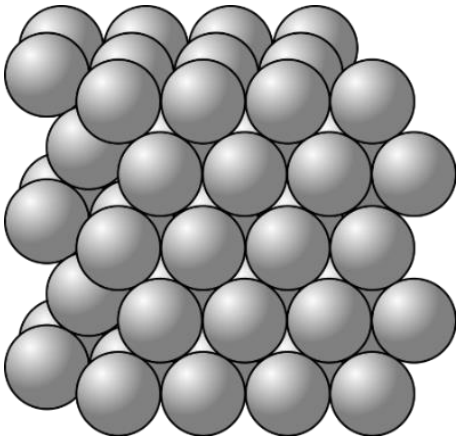
$$n = \frac{V}{V_m}$$

où V_m est le volume molaire que l'on prendra égal à 24 L/mol à la température de la salle d'environ 20°. On obtient alors :

$$n = \frac{1,2}{24} = 0,05mol$$

Sachant que dans 1 mol, il y a $6,02.10^{23}$ molécules de CO_2, on peut dire que le nombre de molécules de CO_2 est $N_{CO2} = 0,05 \times 6,02.10^{23} = 3.10^{22}$ molécules.

Comment en déduire la distance moyenne entre 2 molécules de CO_2 ?



Si nous attribuons une sphère de rayon r à chaque molécule, et que l'on dit que les sphères sont le plus ordonnées possible dans le volume V de solution, comme le montre le schéma ci-contre… (figure 14)

Et bien on se rend compte qu'on oublie de tenir compte du volume de solution entre les sphères…

Après quelques recherches, nous avons vu que lorsque des sphères sont assemblées de façon le plus compact possible, elles occupent un volume égal à 74% du volume total. On peut donc, d'après notre raisonnement, prévoir que le volume de la sphère occupé par chaque molécule de CO_2 vaut :

Figure 14 : *empilement compact des molécules de CO2. Il reste de l'espace entre ces molécules*

$$N_{CO2} \times \frac{4}{3}\pi r^3 = 0,74 \times V \Leftrightarrow r = \left(\frac{0,74 \times V}{N_{CO2} \times \frac{4}{3}\pi}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{0,74 \times 1,2}{3.10^{22} \times \frac{4}{3}\pi}\right)^{\frac{1}{3}} = 1,9.10^{-8} m$$

Ce qui permet de dire que la distance moyenne entre les molécules de CO_2 doit être de l'ordre de 2 fois le rayon, c'est à dire : $3,8.10^{-8} m$

Nous avons cherché à titre d'indication la longueur de la molécule de CO_2 : $2,326.10^{-10}$ m, soit environ 160 fois plus petit que la distance intermoléculaire.

La surpression permet-elle alors de rapprocher les molécules de CO_2 ?

- **Calcul de la variation de volume liée à la surpression :**

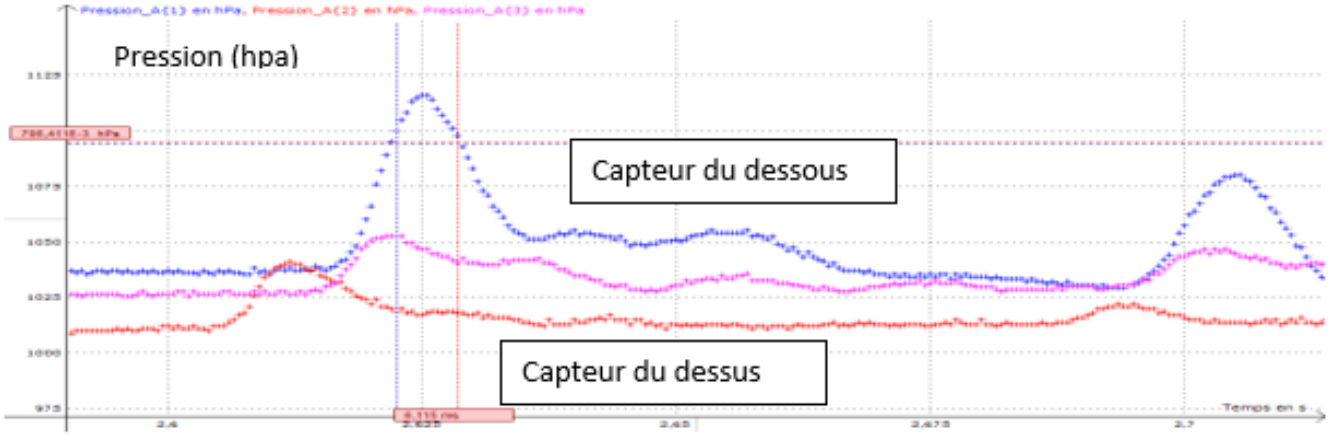
Pour trouver cette relation permettant ce calcul, cela a été plus délicat, mais nous avons tout de même trouvé l'information dans un exercice sur internet, dans lequel il était précisé que

$$\left|\frac{\Delta V}{V}\right| = \chi_T \times |\Delta P| \Rightarrow |\Delta V| = V \times \chi_T \times |\Delta P|$$

ΔV est la variation de volume du liquide lors de la surpression.

V est le volume du liquide qui subit la surpression significative – Il faut alors estimer la zone du liquide qui subit la surpression pour ensuite estimer son volume.

Pour cela, on peut essayer de se baser sur la durée de passage de la perturbation au niveau du capteur du bas :



Nous mesurons que la perturbation passe en 1 point durant environ 6 ms (en considérant arbitrairement uniquement la partie de la perturbation ayant une amplitude supérieure à la surpression maximale divisée par 2). Comme cette perturbation se propage à 21 m/s, on en déduit que le maximum de la perturbation s'étale sur une distance d'environ h = 13 cm.

$$v = \frac{\Delta h}{\Delta t} \Leftrightarrow \Delta h = v \times \Delta t = 21 \times 6.10^{-3} = 0{,}13m$$

Le cylindre de liquide concerné alors par la surpression est environ

$$V = \pi R^2 \times h = \pi 0{,}05^2 \times 0{,}13 = 1.10^{-3} m^3 = 1L$$

χ_T est le coefficient de dilatation isotherme de l'eau, égale à 5.10^{-10} m².N^{-1}

Et $|\Delta P|$ est la surpression du liquide, égale à 8000 Pa pour un coup porté depuis une hauteur de 50 cm.

$$\Delta V = 1 \times 5.10^{-10} \times 8000 = 4.10^{-5} L$$

Le volume de 1L de solution qui subit la surpression est comprimé, d'après nos calculs, de $4.10^{-5} L$, ce qui n'est vraiment pas grand-chose puisque cela représente alors une contraction de volume de seulement 4.10^{-3} % du volume concerné.

Avec une telle variation de volume, on ne peut pas vraiment dire que la distance intermoléculaire soit si réduite que cela lors du passage de la surpression. Peut-être alors que les molécules se rencontrent davantage lors de la surpression parce qu'elles sont secouées par cette perturbation. Leurs mouvements permettent alors statistiquement aux molécules de se rencontrer davantage que si elles demeurent moins mobiles dans la solution.

Nos échanges avec madame Candoni nous ont permis d'envisager une explication :

Lorsque dans une solution, des cristaux se forment, cela résulte d'un passage de la solution qui se trouve dans un état métastable, à une évolution vers un état plus stable. Le passage peut être provoqué par évaporation du solvant, mais

aussi par des vibrations qui vont engendrer des fluctuations de densité au sein de la solution. Les germes de cristaux vont alors naître de ces inhomogénéités. Et c'est bien ce qui pourrait se passer en ce qui concerne la formation des bulles : la pression de CO_2 dans le liquide est plus élevée que la pression en CO_2 à l'extérieur de la bouteille. De ce fait, la solution est dans un état métastable et le coup donné provoque des inhomogénéités à partir desquelles nucléeront les molécules de CO_2.

Nous pouvons à ce stade du projet nous dire que nous avons cerné le sujet. Mais il y a certaines choses qui pourraient bien contrarier nos conclusions.

VI – Une autre explication envisageable ?

1) Quelques éléments discordants….

Trois faits viennent tout de même contrarier nos conclusions.

Le premier d'entre eux concerne les surpressions observées (en haut et en bas de la bouteille) lorsqu'on tape la bouteille par le dessous. Même si ces surpressions sont faibles comparées à celles obtenues côté culot en tapant la bouteille sur le goulot, il est étrange que ces surpressions n'engendrent pas le phénomène observé, à savoir la formation d'une nuage très épais de bulles. La question se pose alors vraiment : peut-on réellement relier la surpression mesurée à la formation de bulles ?

Un deuxième fait nous a également intrigué : en filmant le contenu du liquide contenu dans la bouteille au moment de l'impact, il nous semblait que les bulles de CO_2 déjà présentes sur le bord de la bouteille avant le coup, disparaissaient. Nous avons alors voulu filmer cette disparition de façon plus précise. Pour cela, nous avons disposé un fil de cuivre dans l'eau gazeuse, afin que des bulles s'y accrochent dessus. Cela nous a permis de focaliser l'objectif de la caméra dessus. Lorsqu'on tape alors sur le goulot, vous pouvez visualiser ce que deviennent les bulles en suivant le lien : https://www.dailymotion.com/video/x73iir2 Il s'agit d'une vidéo que nous avons prise avec une caméra filmant avec 240 images par seconde (figure 15).

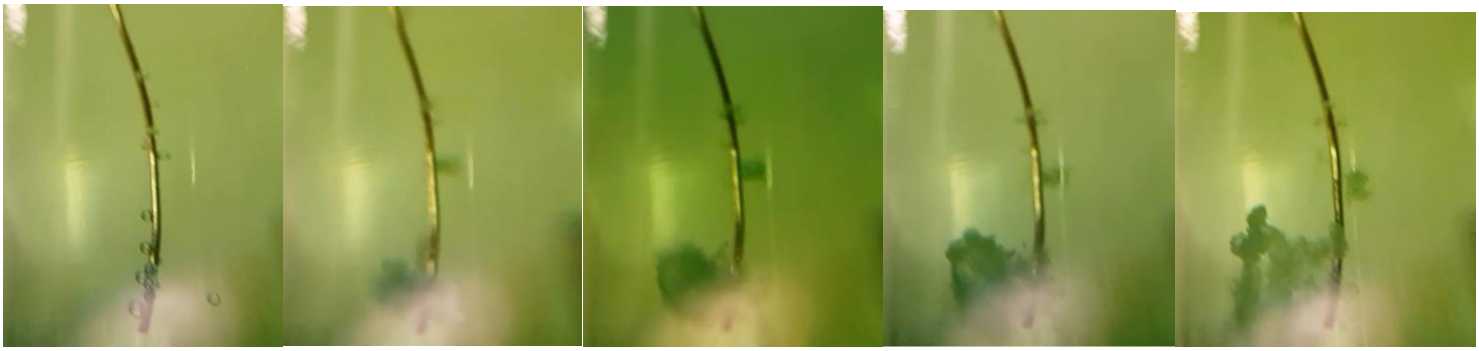


Figure 15 : transformation des bulles de CO2 de rayon environ 1 mm en des milliers de bulles microscopiques

On y voit clairement que les bulles de dimensions de l'ordre du millimètre disposées sur le fil disparaissent lors du coup donné, et se transforment en une quantité impressionnante de microbulles, qui, en montant, grossissent et semblent former d'autres bulles. Ce qui est perturbant, c'est qu'on a pu alors constater, en analysant la bande son et la vidéo, que les bulles éclatent très rapidement après le coup donné ; quasiment dès la première image, soit environ au bout d'une durée de 4 ms. Or, la surpression engendrée par l'onde de flexion met un temps sensiblement plus long pour parvenir en bas de la bouteille : de l'ordre de 14 ms. Les échelles de temps des évènements ne semblent donc pas correspondre, ce qui peut alors contrarier nos conclusions.

Enfin, la troisième chose qui nous a sérieusement poussée à reconsidérer nos conclusions vient de l'observation suivante : lorsqu'on tape une bouteille contenant une boisson gazeuse sur le goulot, la formation du ou des nuages de bulles est bien plus important dans la bouteille en verre que dans la bouteille en plastique. Pourtant, l'onde de flexion évoquée jusqu'à présent est bien plus importante dans la bouteille en plastique que dans la bouteille en verre, puisque

celle-ci est moins déformable que le pastique. Il y a donc ici une incohérence qui remet sérieusement en cause nos interprétations précédentes.

Puisqu'il y a une réelle différence de comportement entre une bouteille en plastique et une bouteille en verre, retrouve-t-on cette différence au niveau de l'évolution de la pression dans l'eau gazeuse contenue dans une bouteille en verre ? Pour répondre à cette question, nous avons voulu mesurer la surpression causée par le coup porté sur le goulot d'une bouteille en verre. Et cela est alors forcément passé par un atelier perçage du verre (figure 16).

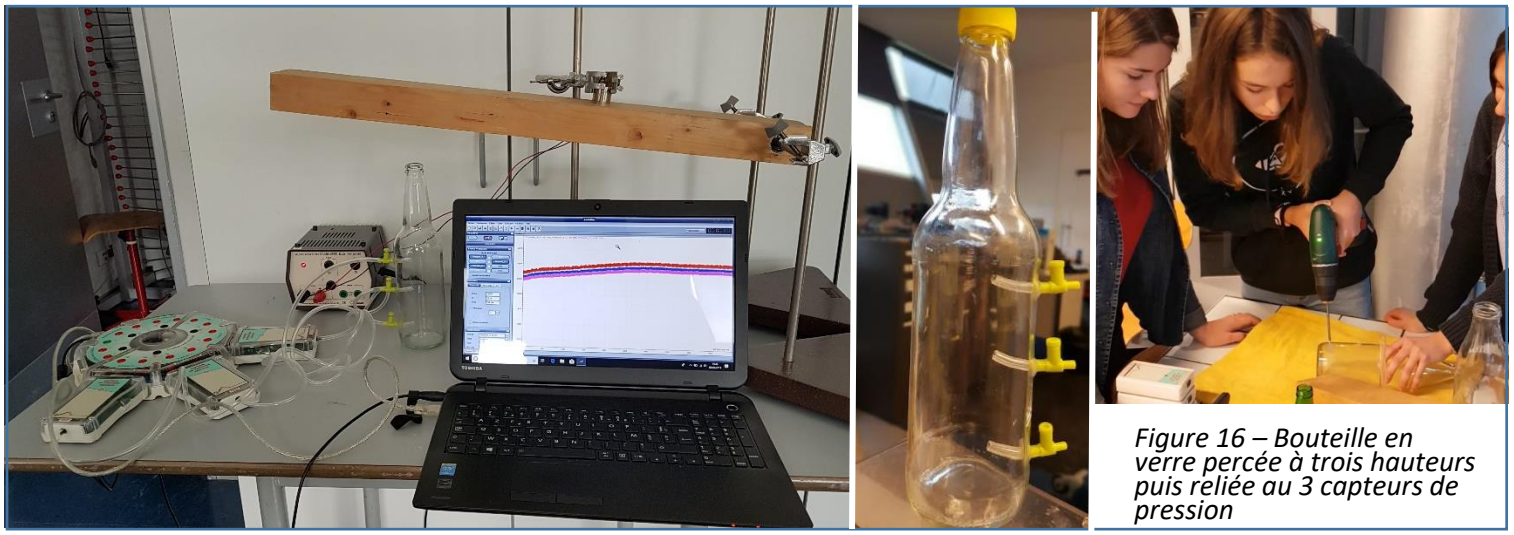


Figure 16 – Bouteille en verre percée à trois hauteurs puis reliée au 3 capteurs de pression

2) Evolution de la pression dans une bouteille en verre :

a – En tapant sur le goulot :

Dans une bouteille de perrier percée près du culot, nous avons alors mesuré l'évolution de la pression après avoir tapé la bouteille sur son goulot. Et voici le résultat obtenu figure 17) : Nous avons bien évidemment reproduit l'expérience de nombreuses fois, et le résultat était toujours similaire. Que peut-on y voir ?

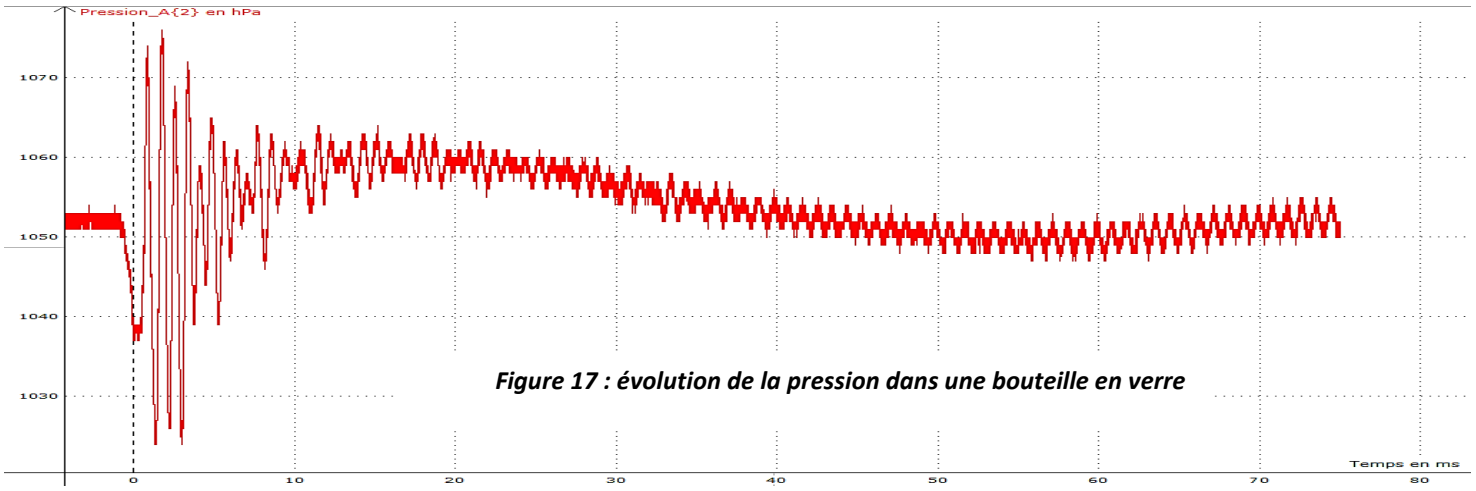


Figure 17 : évolution de la pression dans une bouteille en verre

Tout d'abord, on observe une évolution rapide de la pression, modulée par une évolution plus lente de la pression. On retrouve alors cette évolution lente que nous avons attribué à l'onde de flexion le long de la bouteille. Et comme nous le pensions, le verre étant moins déformable que le pastique, la valeur de la surpression (due à l'onde de flexion) est beaucoup moins importante que celle obtenue avec la bouteille en plastique (environ 1000 Pa au lieu de 8000 Pa). Par contre, l'évolution rapide de la pression est quelque chose que l'on n'observait pas lors des expériences réalisées avec les bouteilles en plastique : la pression varie selon une échelle de temps bien plus faible que celle correspondant aux ondes de flexion. Cette oscillation se déroule avec une période de l'ordre de 1 ms, en commençant par une très forte dépression, suivie d'une surpression et ainsi de suite. L'onde de flexion ne pouvant pas être responsable des 2 évolutions

de la pression (lente et rapide), nous pensons alors que cette évolution rapide de la pression est en réalité due à une onde de compression : la bouteille subirait une compression engendrée par le coup porté sur le goulot. Et cette compression communiquerait alors une dépression dans le liquide au fond de la bouteille. La dépression observée pourrait bien expliquer le fait alors que les bulles déjà présentes dans le liquide au moment du coup se détruisent en formant une quantité phénoménale de microbulles. En effet, la dépression rapide pourrait effectivement faire grossir les bulles de façon violentes. La rapidité de la déformation de la bulle pourrait rendre la bulle plus fragile d'un point de vu mécanique, ce qui la casserait alors dans un temps très bref. Cette échelle de temps est par ailleurs complètement compatible avec les mesures réalisées précédemment sur la vidéo (figure 15), montrant une disparition de la bulle au bout d'un temps maximal d'environ 4 millisecondes.

Puisqu'on cherche toujours à expliquer la différence de comportement entre la bouteille du dessus et celle du dessous, que se passe-t-il alors si on tape la bouteille en verre par le dessous ?

b – Evolution de la pression en tapant sur le culot :

Figure 18 : *Evolution de la pression lors du coup donné sur le culot*

Et bien cette fois-ci (figure 18), et c'est systématiquement le cas, il y aussi une variation de la pression, mais qui commence par une surpression et non une dépression. C'est une différence de taille, qui peut alors expliquer la différence de mousse formée entre les bouteilles du dessus et du dessous lorsqu'on tape l'une sur l'autre.

En effet, on observe que le coup porté sur la bouteille du dessous forme de la mousse, qu'il y ait ou non initialement des bulles de gaz visibles dans le liquide.

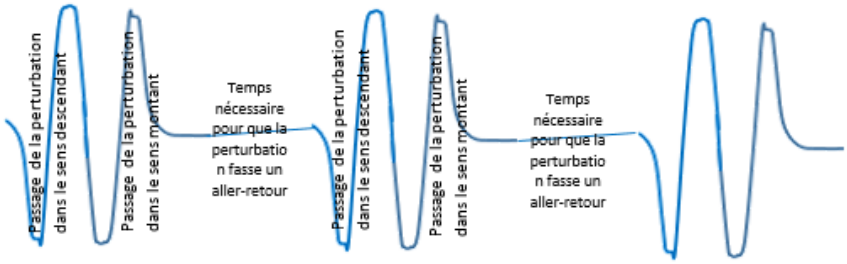
Or une dépression dans le liquide de la bouteille du dessous détend la boisson, ce qui favorise l'apparition de bulles visibles. Ces bulles grossissent alors et subissent de façon générale les fortes variations de pression, ce qui doit les casser en centaines, voire plus, de microbulles. Mais dans la bouteille du dessus, le fait de commencer par une forte surpression ne permet pas cette formation de bulles. Ces derniers résultats et les interprétations que l'on en fait ici semblent vraiment expliquer les différences de comportement du liquide dans la bouteille du dessus et celle du dessous lorsqu'on tape l'une sur l'autre.

Tentons maintenant d'aller plus loin en essayant par exemple de comprendre pourquoi la pression oscille dans le liquide…

3) Qu'est ce qui est responsable de l'oscillation de la pression au sein du liquide ?

a – Peut-il s'agir d'une perturbation qui fait des allers retours, de haut en bas dans le liquide ?

Puisque la pression oscille, l'onde de compression qui en est responsable pourrait effectivement faire des allers retours dans le liquide. Mais si tel était le cas, on le verrait alors sur nos courbes. Par exemple, au niveau du capteur du dessous, on verrait la pression évoluer de la manière suivante (figure 19) :



En effet, la perturbation passe au niveau du capteur du fond dans le sens descendant, puis tout de suite après dans le sens montant. Il faudrait alors attendre que la perturbation fasse ensuite un aller-retour pour se retrouver à nouveau au niveau du capteur du fond dans le sens descendant, puis montant.

Figure 19 : *simulation de l'évolution de la pression au niveau du capteur du bas dans le cas d'aller retours de la perturbation dans le liquide contenu dans la bouteille.*

Mais vu que l'on observe une évolution de la pression beaucoup plus régulière dans le temps, et ne montrant pas de délais entre les suites de dépression surpression, on en conclue qu'il ne s'agit pas d'une perturbation qui fait des allers retours dans le liquide contenu dans la bouteille.

b – Peut-il s'agir d'une onde stationnaire dans le liquide ?

S'il ne s'agit pas alors d'une perturbation qui fait des allers retours de haut en bas dans le liquide, il est possible qu'il s'agisse d'une onde stationnaire de compression, le long de la hauteur du liquide. Dans ce cas, il doit y avoir présence de ventre et nœud de pression. On doit donc pouvoir tester cette hypothèse en mesurant l'évolution de la dépression maximale en fonction de la hauteur du liquide dans la bouteille en verre pour rechercher la présence éventuelle de ventres et nœuds. Après avoir percé une bouteille de verre, nous avons glissé un tuyau que nous avons rigidifié avec un fil métallique, de façon à mesurer la pression en restant sur une verticale dans le liquide. Les résultats obtenus sont visibles (points bleus) dans le graphique figure 21. Ils ne montrent rien qui ressemble à une onde stationnaire dans le liquide. En effet, s'il s'agissait d'une onde stationnaire, on aurait alors au moins présence d'un nœud et un ventre de pression, donc une pression qui aurait évolué comme indiqué par la courbe rouge en fonction de la profondeur dans le liquide.

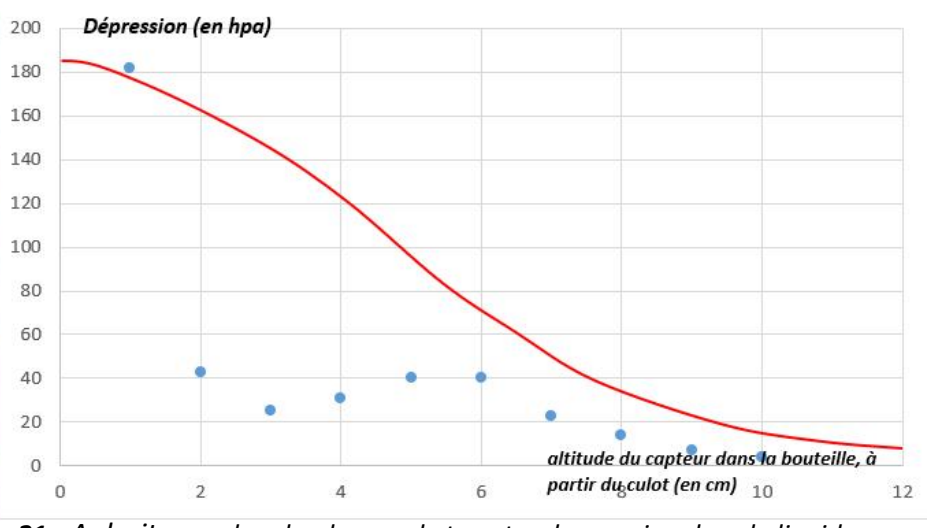


Figure 21 : *A droite : recherche de nœud et ventre de pression dans le liquide*
Figure 20 : A gauche : *bouteille permettant la mesure de la pression en fonction de la hauteur du capteur*

Comment alors expliquer l'oscillation de la pression ?

Il semble peu probable que cette oscillation de la pression corresponde simplement à une oscillation libre de l'eau suite au coup donné car la viscosité du liquide devrait rapidement atténuer ces oscillations. Et d'autre part, cela n'expliquerait pas pourquoi l'amplitude de la perturbation est si forte au niveau du culot comparé au reste du liquide.

Pour comprendre l'origine de l'évolution de la pression, il nous a fallu procéder autrement : nous avons décidé de faire varier certains paramètres. Par exemple, est-ce qu'elle dépend de la hauteur de l'eau gazeuse dans la bouteille en verre ?

c – Est-ce que la période des oscillations dépend de la hauteur de liquide dans la bouteille ?

Nous avons tapé sur le goulot de la bouteille en verre contenant différentes hauteurs (5 cm, puis 10 cm, puis 15 cm) d'eau gazeuse. Nous avons alors mesuré la dépression au même endroit au fond de la bouteille (figure 22).

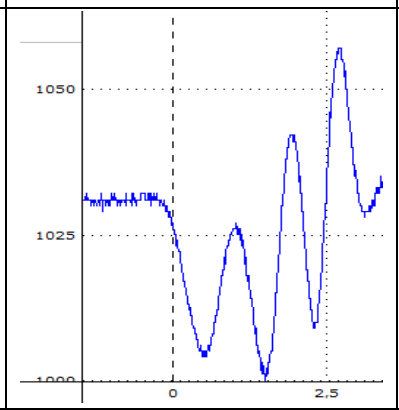
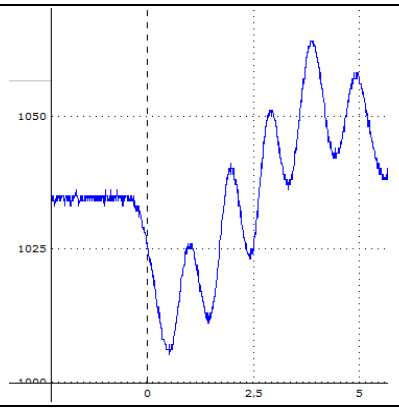
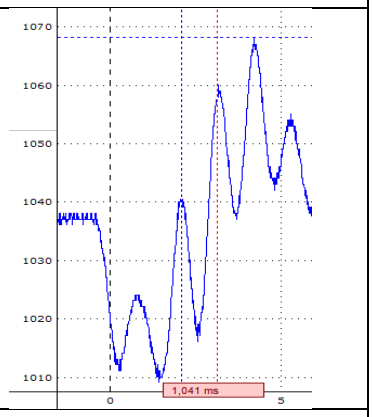
Hauteur d'eau gazeuse (cm)	**5**	**10**	**15**
Acquisition			
Période (ms)	**1**	**1**	**1**

Figure 22 : *Mesure de la période des oscillations de la pression en fonction de la hauteur de liquide dans la bouteille.*

Et les résultats obtenus montrent sans équivoque que, dans les trois cas, la période des oscillations ne variant pas, ce n'est pas la hauteur d'eau qui influence la valeur de la période des oscillations observées.

Alors est ce que cela peut venir de la hauteur de la bouteille en verre ? Pour répondre à cette question, nous avons percé différentes bouteilles en verre, de hauteurs différentes. Nous avons également utilisé une éprouvette de 500 mL et de hauteur 44 cm. Voici alors les résultats obtenus (figure 23):

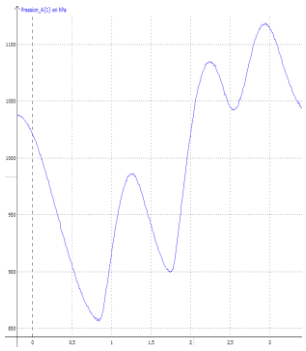
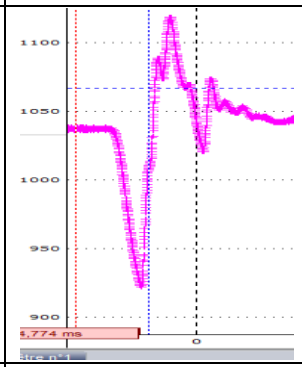
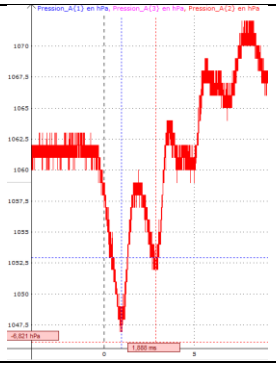
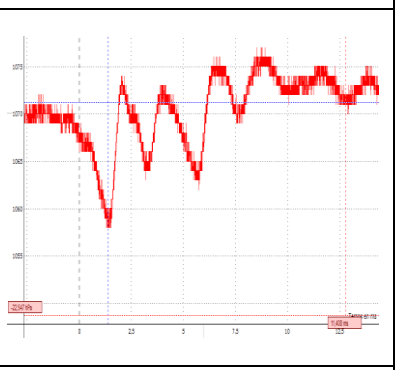
Bouteille	**Flacon de chimie**	**Bouteille de bière**	**Bouteille de jus de pomme**	**Eprouvette**
Hauteur (cm)	**18**	**22**	**28,5**	**44**
Acquisition				
Période (ms)	**0,9**	**1,1**	**1,9**	**2,2**

Figure 23 *: Mesure de la période des oscillations de la pression en fonction de la hauteur de la bouteille en verre.*

Ces résultats montrent que la période des oscillations dépend de la hauteur de la bouteille : plus la bouteille est grande, et plus la période des oscillations est grande.

Ces derniers résultats sont doublement intéressants : ils semblent en effet montrer que l'oscillation de la pression soit due à une onde de compression dans le verre de la bouteille lui-même, qui fait des allers retours sur la totalité de la hauteur de la bouteille. Lorsqu'elle arrive au bas de la bouteille, cette perturbation doit d'une certaine manière être transmise au culot de la bouteille. Le mouvement du culot doit alors engendrer une perturbation de la pression au sein du liquide. Nous pensons alors que les allers retours de la perturbation dans le verre de la bouteille provoque un mouvement d'oscillation du culot de la bouteille, qui provoque lui-même une dépression suivie d'une compression au sein du liquide. Cette succession de dépression/compression qui prend alors naissance dans le fond de la bouteille se propage alors dans le liquide jusqu'en haut de la bouteille, mais l'atténuation de la perturbation au cours de cette propagation dans le liquide (voir figure 21) est telle qu'au bout de 2cm, de parcours, l'amplitude de ces compressions/dépressions devient trop faible pour générer des bulles

Enfin, comme on peut le voir sur l'ensemble de nos résultats, cette oscillation de la pression est dans tous les cas modulée par une variation plus lente de la pression, qui semble être imputable à une onde de flexion qui elle aussi se propage de haut en bas dans la bouteille.

4) Une confirmation irréfutable de l'ensemble de nos conclusions…

Au cours de notre projet, nous avons filmé ce que devenait des bulles (figure 15 page 14) déjà présentes dans l'eau gazeuse lorsque nous tapons sur le goulot de la bouteille, à 240 images par seconde. Nous nous sommes dit qu'il serait alors vraiment intéressant si on pouvait filmer la scène avec un nombre d'image par seconde plus élevé, pour voir si, sur des temps de l'ordre de la période des oscillations de la pression, quelque chose serait particulièrement observable.

Puisque la période des oscillations est de l'ordre de la milliseconde, cela signifie qu'il faut alors filmer à au moins 10000 images par seconde, pour avoir au moins 10 images par période. Nous sommes alors entrés en contact avec un laboratoire de recherche de l'Université de Poitiers qui nous a aiguillé vers une unité Pprime qui possède des caméras capables de prendre jusqu'à 40000 images par seconde. Après des discussions avec Romain Bellanger, ingénieur d'Etudes CNRS et Patrick Braud, ingénieur de recherche Métrologie Optique (figure 24), nous avons pu confectionner la bouteille dans laquelle nous allions transformer les bulles en des milliers de microbulles en tapant sur le goulot. Nous avons dû en effet tenir compte de contraintes telles que :

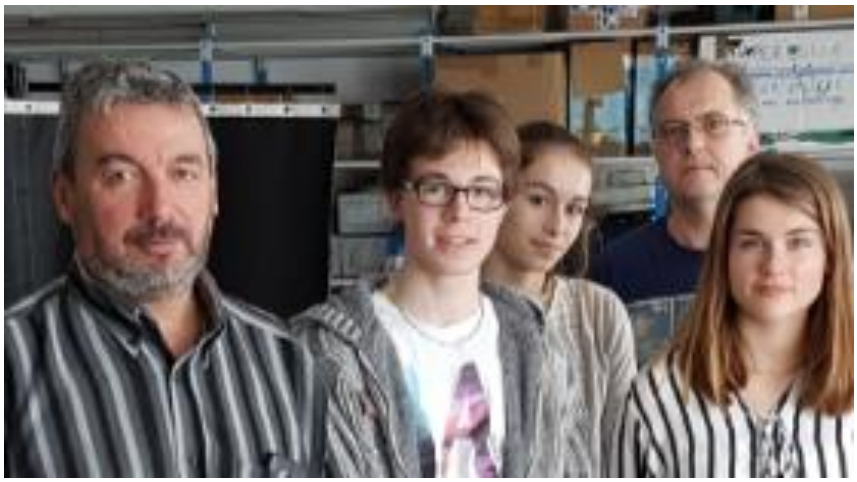


Figure 24 *Monsieur Braud (à gauche), et Monsieur Bellanger (à droite)*

- Une profondeur de champ de la caméra de l'ordre du millimètre. Il faut donc que la bouteille, et le fil sur lequel les bulles se forment, ne bougent pas de plus d'1 millimètre lors du coup donné, sans quoi le fil et donc les bulles, sortiraient de la zone de netteté de la caméra.
- Un fort éclairement de la scène. En effet, la vitesse d'obturation de la caméra est tellement rapide, que peu de lumière imprègne le capteur de la caméra. Pour que la lumière traverse le plus possible le verre de la bouteille, on a choisi une bouteille en verre transparent. Et pour que la vidéo réalisée ne présente pas de déformation à cause de la forme arrondie de la bouteille, nous avons opté pour une bouteille à base carrée.

- Une bonne synchronisation entre le coup donné et le déclenchement de la caméra, car avec plus de 10000 images par seconde, le poids du fichier devient une donnée à prendre en compte. On évite donc de déclencher l'acquisition vidéo trop tôt par rapport au coup donné.

Voici alors la bouteille ainsi que le fil que nous avons cherché à rendre le plus immobile possible (figure 25) :

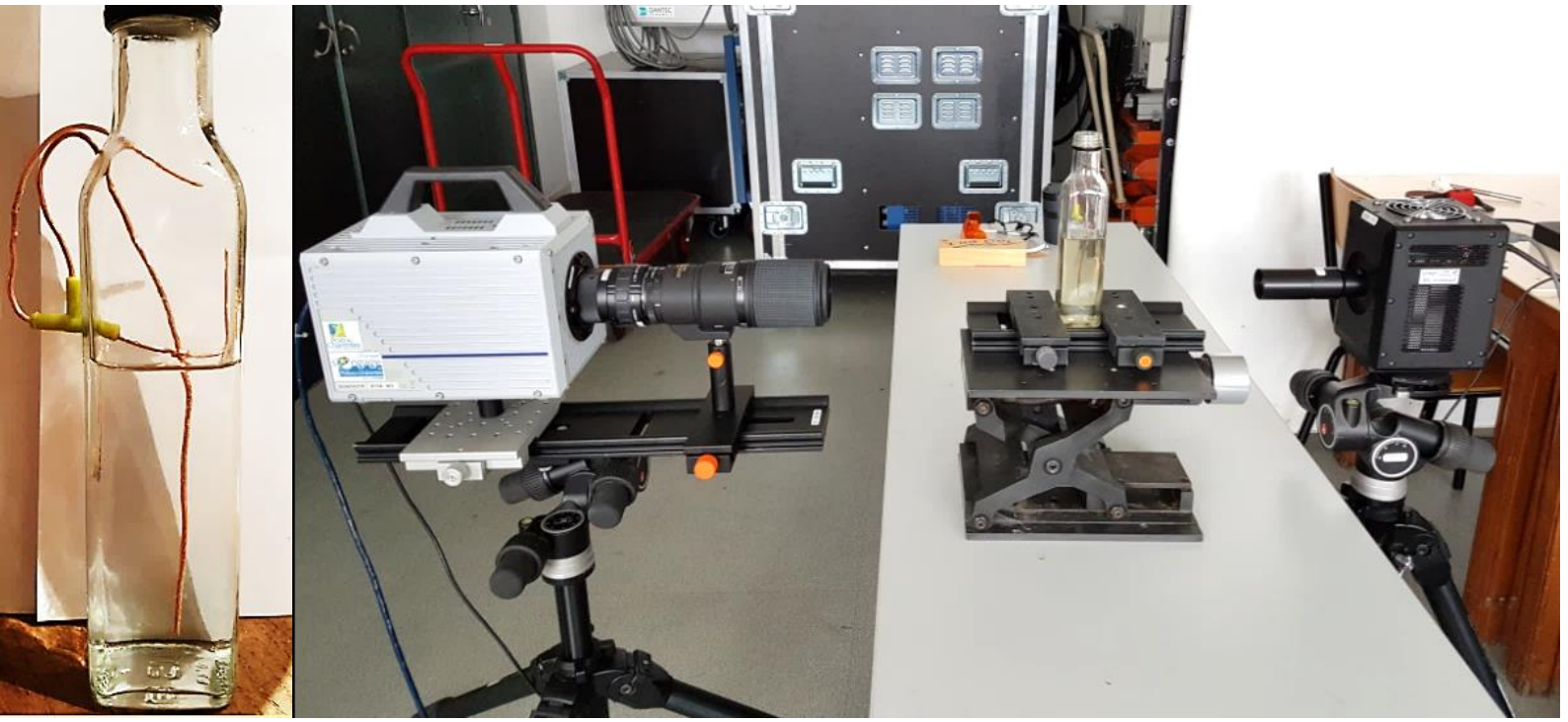


Figure 25 : *A gauche : bouteille contenant un fil de cuivre que nous avons rayé afin de créer des aspérités sur lequel des bulles de gaz vont nucléer en attendant le coup donné sur la bouteille. Le fil vertical passe par un trou fait en haut de la bouteille et passe dans une boucle d'un fil de cuivre horizontal, afin de le stabiliser au maximum. Aucun fil de sort du goulot, de sorte de pouvoir taper sur le goulot sans que cela ne perturbe la position des fils de cuivre. A droite, système d'acquisition comportant la caméra à gauche, la bouteille maintenue sur une platine au milieu, et la lumière à droite.*

Le résultat de l'expérience est alors spectaculaire. En tout cas, il l'a été pour nous. Tout d'abord car ne nous attendions pas à pouvoir observer aussi précisément ce qui se passe lorsque les bulles explosent, et parce que les résultats confirment les conclusions que nous avons formulées dans ce mémoire.

Voici ci-dessous une séquence d'images. Nous avons par ailleurs réalisé un montage avec différentes vidéos que nous avons réalisées au laboratoire PPrime, que nous avons déposé à l'adresse suivante sur internet, et qu'il faut absolument visionner :

https://www.dailymotion.com/video/x73ihz5

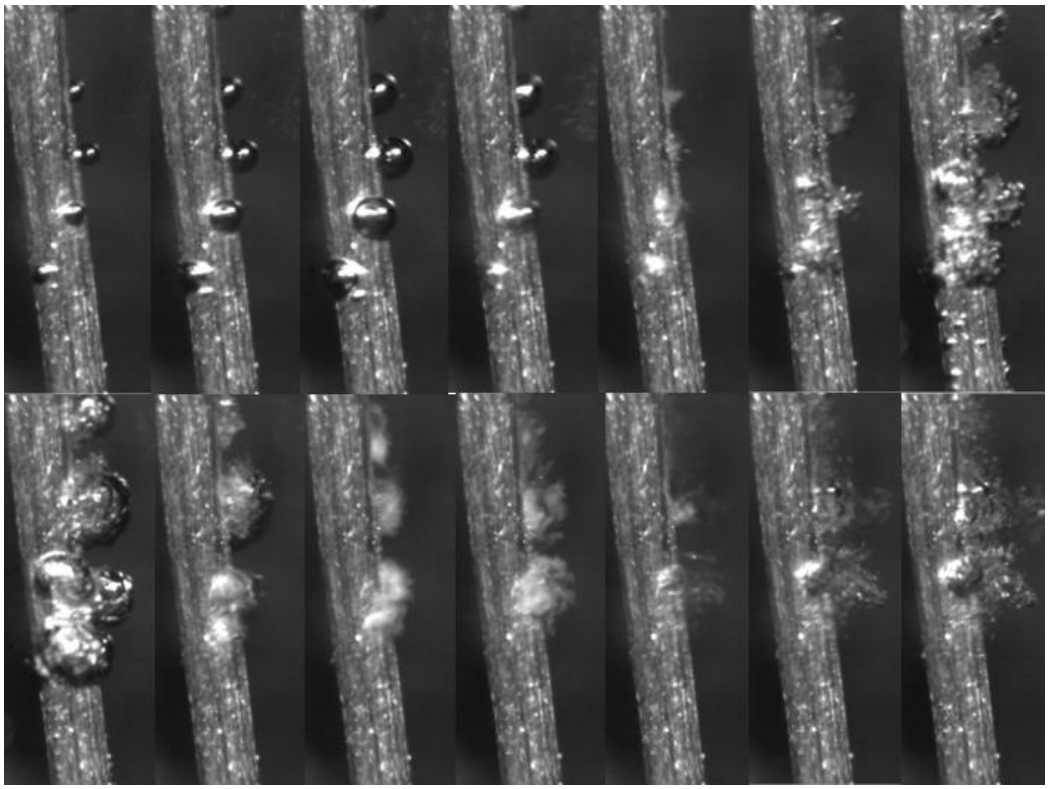


Figure 26 : *évolution des bulles apparue sur le fil de cuivre trempant dans l'eau gazeuse après avoir donné un coup sur le goulot de la bouteille.*

Sur cette séquence d'images, on remarque que le volume des bulles commence par augmenter, puis diminue avant que la bulle n'implose et se casse en des bulles microscopiques qui occupent alors une zone de l'espace correspondant aux bulles qui leur ont donné naissance. Le volumes des amas de bulles continuent alors d'osciller. Et grâce à la connaissance du nombre d'image par seconde avec lesquelles les vidéos ont été prises (parfois 10000 et parfois 20000 images par seconde sur la vidéo), nous avons pu trouver que la période des oscillations est de l'ordre de la milliseconde, donc une valeur très compatible avec la période d'oscillation de la pression dans la bouteille. C'est en cela que cette expérience valide nos conclusions quant à l'origine de la formation de la mousse.

VII– Que peut-on apprendre de plus de nos expériences ?

1) Quelle quantité de CO_2 s'échappe du liquide lorsqu'on donne un coup depuis une hauteur 50 cm ?

Comme nous voulons percer tous les mystères qui se cachent derrière le phénomène étudié, nous nous sommes dit qu'il serait intéressant de savoir quelle proportion de gaz se dégage de la bouteille lorsqu'on lui tape dessus. Comme cela dépend de la force du coup donné, voyons déjà ce que cela donne pour une hauteur du morceau de bois de 50 cm :

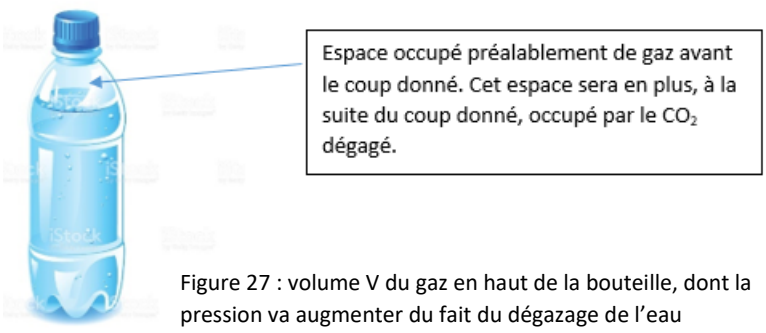


Figure 27 : volume V du gaz en haut de la bouteille, dont la pression va augmenter du fait du dégazage de l'eau gazeuse suite au coup donné.

Pour réaliser cette expérience, nous avons eu l'idée de travailler avec une bouteille d'eau gazeuse fermée par son bouchon. Ainsi, en donnant un coup sur la bouteille, le gaz de CO_2 s'échappant du liquide et ne pouvant s'échapper de

la bouteille, viendra s'ajouter à l'air déjà présent au-dessus du liquide, augmentant alors la pression qui y règne d'une quantité ΔP (figure 27).

Donc, en mesurant la surpression ΔP, le volume V de gaz piégé dans la partie haute de la bouteille, et connaissant la température du gaz, il est possible, avec la loi des gaz parfaits, de remonter à la quantité de matière de CO_2 qui se dégage de la solution.

Concernant la mesure de la surpression ΔP, il suffit de réutiliser notre bouteille reliée aux capteurs de pression. En effet, même si ces capteurs de pression mesurent la pression dans le liquide, le fait d'augmenter la pression de l'air au-dessus du liquide augmente la pression du liquide de la même valeur en tout point du liquide.

Voici le résultat expérimental obtenu (figure 28) :

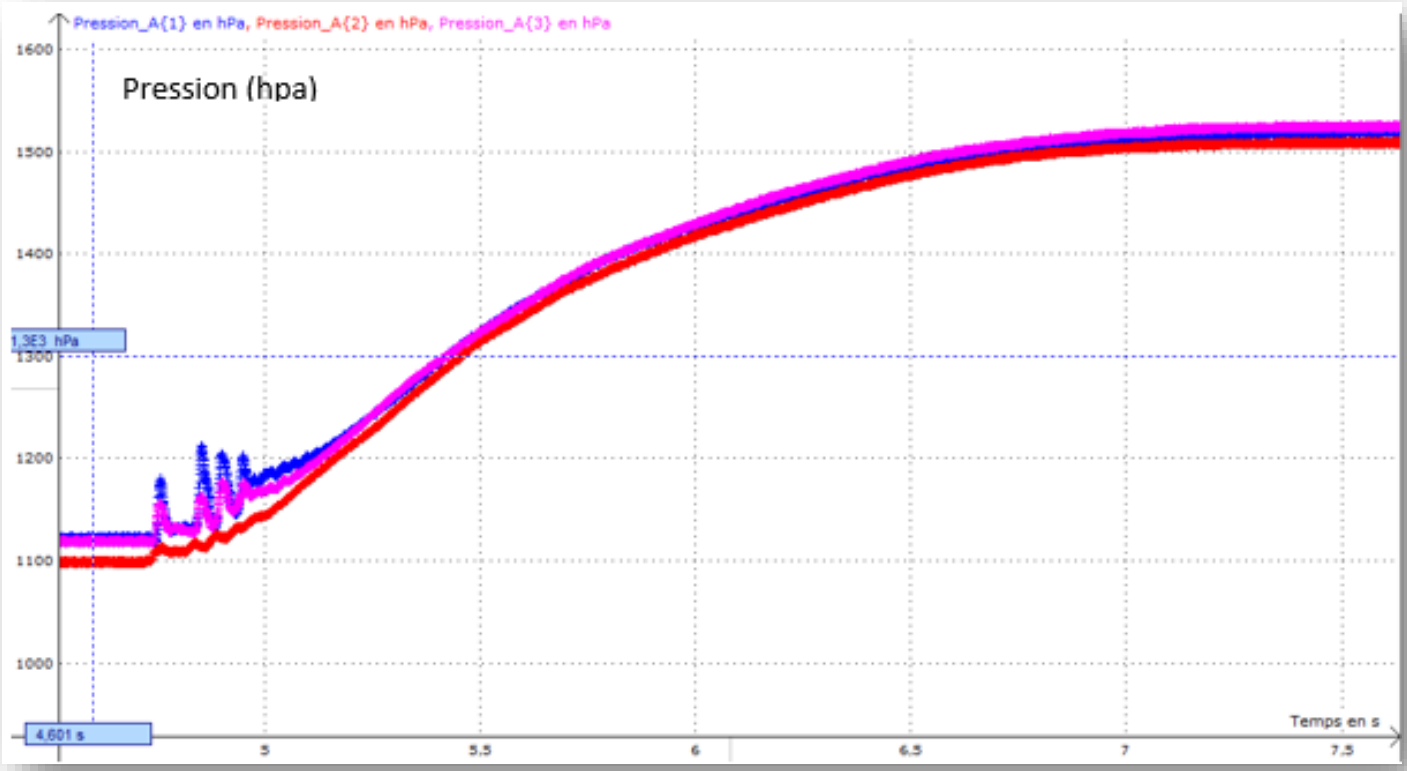


Figure 28 : évolution des pressions dans le cas de la bouteille fermée

Nous mesurons ainsi une variation de pression de 4.10^4 Pa. Nous avons estimé le volume V de gaz concerné à 125 cm^3, en remplissant la bouteille à ras bord et en la vidant ensuite dans une éprouvette graduée jusqu'à ce que le niveau de l'eau dans la bouteille atteigne un trait indiquant le niveau du liquide qu'elle contenait. Nous avons alors trouvé un volume de gaz égal à V = 125 cm^3. Comme la température de la salle était alors de 21 °C, on obtient :

$$\Delta P \times V = n_{CO2} \times R \times T$$

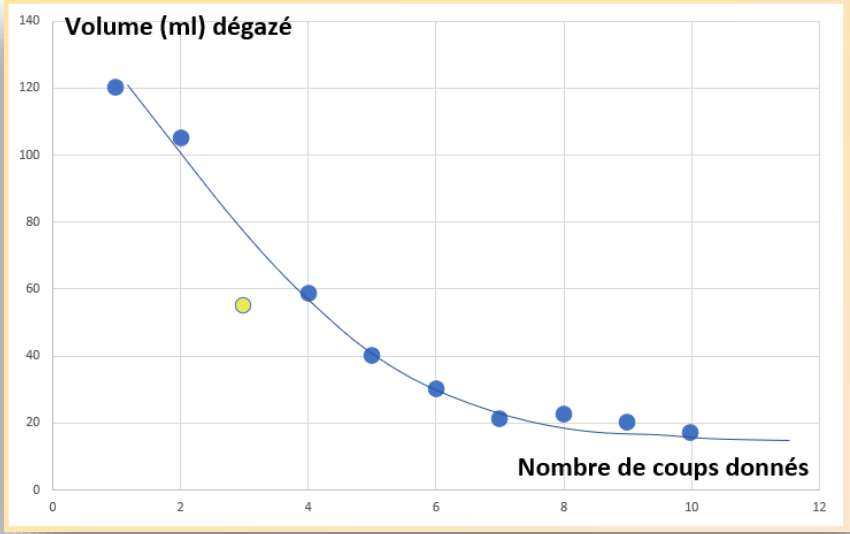
(C'est bien ici le nombre de mole de CO_2 qui est responsable de la variation de pression.)

$$\text{Donc } n_{CO2} = \frac{\Delta P \times V}{R \times T} = \frac{4.10^4 \times 1{,}25.10^{-4}}{8{,}314 \times 294} = 2.10^{-3}\, mol$$

Comparé au nombre de mole de CO_2 dissoutes initialement (évalué à 0,05 mol dans le deuxième paragraphe), cela fait 4% du gaz dissout.

Remarques :

- Lorsque l'on tape sur la bouteille, bouchon fermé, l'expérience montre bien une élévation importante de la pression (il s'agit tout de même d'une augmentation qui correspond à 36% de sa valeur initiale !), mais pour autant, aucune bulle de gaz visible n'apparaît au sein du liquide durant l'expérience. Les bulles de CO_2 doivent pourtant être présentes sinon on n'observerait pas cette élévation de la pression. On pense que le fait que la pression dans la bouteille soit élevée fait que la pression du liquide l'est aussi, ce qui empêche, d'un point de vue mécanique, d'avoir des grosses bulles de gaz dans l'eau.
- Il est possible que lorsque la bouteille est ouverte, davantage de gaz soit formé en tapant sur la bouteille, car la valeur pression au-dessus du liquide serait alors toujours celle de la pression atmosphérique, contrairement à ce qui se passe lorsque le bouchon de la bouteille est fermé : si le bouchon est fermé, le dégazage s'arrête lorsqu'un équilibre est atteint entre la pression de gaz présent dans le volume V, et la concentration du gaz présent dans le liquide. Du coup, on a fait une autre expérience au cours de laquelle nous avons mesuré directement la quantité de gaz obtenu en tapant sur la bouteille (figure 29) : On a tapé sur la bouteille fermée, percée en haut pour permettre au gaz formé de sortir par un tuyau arrivant sous une éprouvette remplie d'eau. On a ainsi mesuré le volume de gaz par déplacement d'eau.



A gauche : Figure 29 : Bouteille d'eau gazeuse fermée, dans le but de mesurer le volume de gaz qui sort de la solution après le coup donné.

A droite : Figure 30 : Mesure du volume de gaz dégazé en fonction du nombre de coups donnés

On a alors mesuré (figure 30) qu'après avoir donné un coup sur la bouteille, on a dégazé un volume de 120 mL sur les 1,2 L de CO_2 initialement dissout. Cela représente donc 1 dixième du gaz dissout. Et en continuant à donner des coups sur la bouteille, il s'avère qu'après 10 coups, on a expulsé près d'un tiers du gaz de CO_2 initialement dissout. Taper sur la bouteille pour dégazer la boisson est donc une méthode efficace, mais attention aux dégâts collatéraux….

2) Variation lente de la surpression après le choc… comment l'interpréter ?

Nous avons, dès nos premières expériences quantitatives avec les bouteilles en plastique, attribué la variation lente de la pression aux ondes de flexion. Nous n'avons par contre jamais abordé le fait que cette variation lente présente elle aussi une oscillation au cours du temps (figure 31). On retrouve cette oscillation même lorsque la bouteille est fermée par un bouchon (figure 28). Comment l'interpréter ?

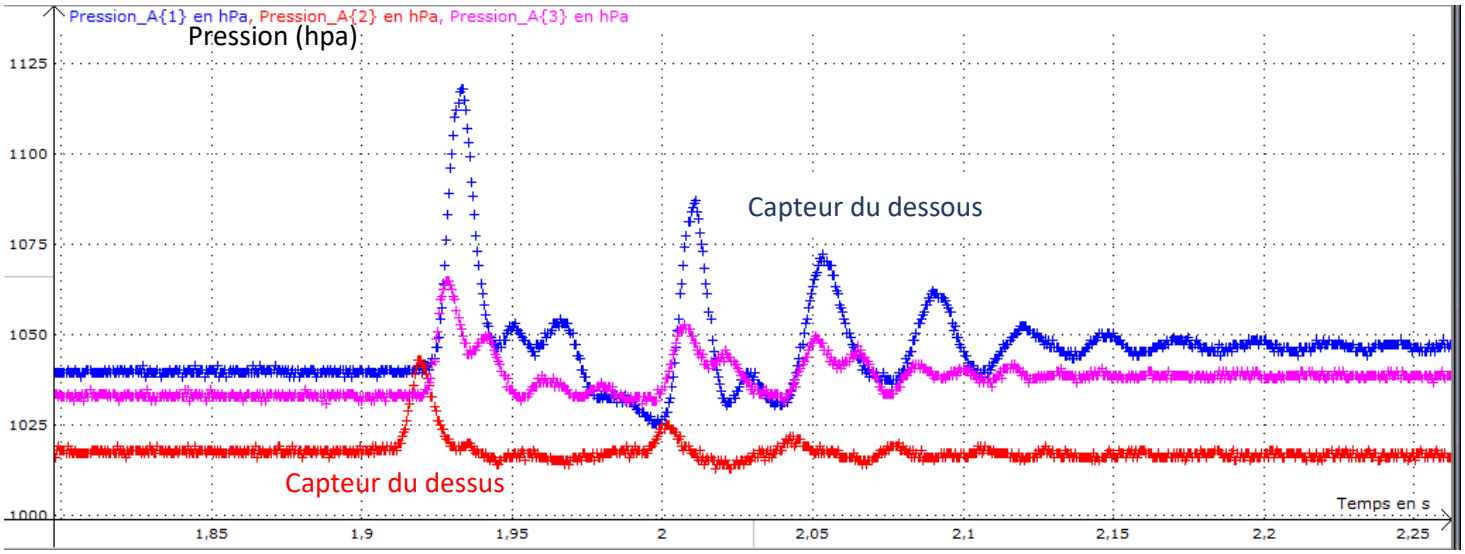


Figure 31 : oscillation des pressions après avoir donné le coup sur la bouteille

Hypothèse : se peut-il, là aussi, que la perturbation, c'est-à-dire l'onde de flexion, à l'origine de cette surpression fasse des allers-retours depuis le haut vers le bas ?

Passé le tumulte de la première surpression, nous avons pu lire sur le graphique ci-dessus que la variation de la pression se fait avec une fréquence d'environ 30 Hz.

Est-ce qu'alors, cette valeur est compatible avec l'hypothèse formulée ?

Nous connaissons la valeur de la vitesse à laquelle la surpression se déplace de haut en bas : 21 m/s. Cherchons alors combien de temps il faudrait à la perturbation pour faire un aller-retour de haut en bas dans la bouteille :

Sachant que la hauteur de la bouteille est 35 cm et que la vitesse de déplacement de la perturbation vaut 21 m/s,

Cela fait une durée pour un aller-retour de : $t = \frac{2h}{v} = \frac{2 \times 0{,}35}{21} = 0{,}033s$, ce qui correspond à une fréquence de 30 Hz !

Les résultats semblent donc compatibles. On est alors vraiment tenté de dire que l'oscillation observée résulte d'aller-retour de la surpression sur une direction verticale !

Cela dit, même si la correspondance semble parfaite, il pourrait y avoir une autre explication…mais on ne la voit pas.

Conclusion

Le phénomène observé nous semble vraiment complexe. Il l'est d'autant plus que l'on en n'observe que les effets. Pour tenter de comprendre la cause de la formation de la mousse, il nous a fallu passer par de nombreuses expériences, et tenter de suivre l'évolution de variables, en espérant que l'une d'entre elles dévoile quelques mystères cachés dans la bouteille.

Le suivi de la pression, selon que le coup a été donné sur le dessus ou sur le dessous de la bouteille nous a permis de beaucoup avancer sur la compréhension du phénomène. Mais au final, c'est en changeant les conditions expérimentales, en particulier en passant d'une bouteille en plastique à une bouteille en verre, que nous avons pu comprendre réellement le phénomène observé. Nous avons dû pour cela formuler de nombreuses hypothèses, dont certaines ont été vérifiées expérimentalement. Et les expériences menées nous ont parfois permis de mener des raisonnements que l'on n'envisageait pas initialement.

Nous avons eu la chance de pouvoir réaliser un film très précis sur ce qui se passe au sein du liquide au moment du coup donné, ce qui a permis de valider nos conclusions.

C'était passionnant et ce n'est sûrement pas fini car il reste encore des questions. Par exemple, il serait intéressant de savoir comment la forme de la bouteille intervient exactement sur la formation des bulles. Autre chose, nous n'avons pas étudié l'influence des différents ingrédients que l'on trouve dans la boisson gazeuse. Or on a remarqué que les bulles formées dans la bière sans alcool ou dans la limonade sont bien plus nombreuses, et de très petites tailles par rapport à celle formées dans une bouteille dans laquelle on a injecté uniquement du CO_2 dans l'eau. Une autre suite importante que nous aimerions donner à notre projet serait de confectionner une bouteille en verre, avec un souffleur de verre, dont la forme permettrait de limiter la formation de bulles en cas de coup donné. Et pour finir, nous vous laissons visionner cette vidéo que nous avons prises en filmant la bouteille par le dessous au moment de l'impact sur le goulot : https://youtu.be/7uIacF7TpKg . Il semblerait que la formation des bulles se fasse préférentiellement en certains endroits du culot de la bouteille. Il reste visiblement des choses à dire concernant notre projet…

Remerciements :

INSTITUT P'
Sciences à l'École
CINaM Centre Interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille
académie Poitiers
MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
Université de Poitiers
FONDATION CGENIAL
OLYMPIADES DE PHYSIQUE FRANCE
LP2I Lycée Pilote Innovant International