

**Un écoulement
quotidien**



pas si simple

Avec l'aide des professeurs :

M^{me} Larasse
et M. Brasselet

Et du chercheur :
M. Reyssat

**Olympiades
de
Physique**

Xavier LE GALL
Philippe-Henri BLAIS
Fabrice BENHAMOUDA

Sommaire

Introduction.....	3
Observations.....	4
La tension superficielle.....	6
I Qu'est-ce que la tension superficielle ?.....	6
II Quelques expériences sur le phénomène de tension superficielle.....	6
1) Le savon.....	6
2) Le verre « plus que plein ».....	7
3) Le bateau.....	7
III Quelques conséquences de la tension superficielle observables quotidiennement.....	8
IV Comment mesurer la tension superficielle ?.....	9
1) L'appareil de mesure par arrachement.....	9
2) Étalonnage de l'appareil.....	9
3) Obtention de l'indice de tension superficielle.....	9
Mesures et exploitation.....	10
I Les torsades.....	10
1) Avec de l'eau et des bouteilles.....	10
2) Mesures et temps crunch.....	10
3) Modèle théorique.....	11
4) Avec de l'eau savonneuse.....	12
5) Les autres torsades.....	13
II Le collé.....	14
1) Encore des bouteilles verticales.....	14
2) Modèle théorique.....	15
Conclusion.....	17
Annexe 1 - Mesure de la longueur de la première torsade.....	18
Annexe 2 - Comparaison, eau – eau savonneuse.....	21
Annexe 3 – Vitesse à partir de laquelle apparaît le collé.....	22

Introduction

L'eau est un élément essentiel dans la constitution de la planète. Elle représente non seulement près de 70 % de la surface de la planète, mais il est aussi possible de l'utiliser dans sa dynamique comme source d'énergie. L'étude de cet élément est donc importante et principalement celle de sa façon de s'écouler.

C'est pourquoi notre intérêt s'est porté sur deux points principaux : quelle forme prend l'eau lorsqu'elle s'écoule ? Pourquoi l'eau colle-t-elle à la paroi d'un récipient dans certains cas ?

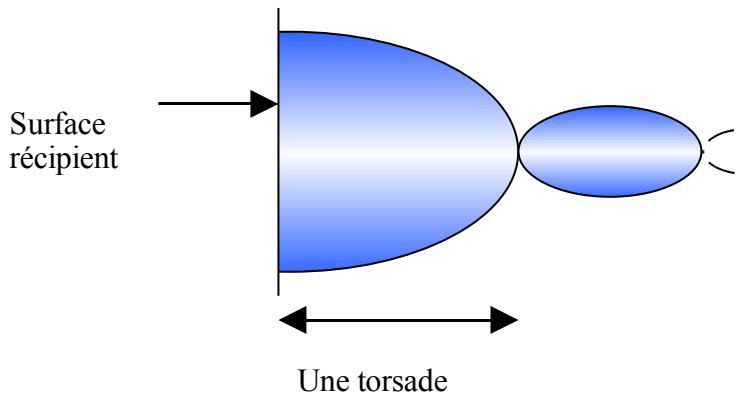
A partir de quelques observations générales, nous avons mis en évidence que la cause principale devait sûrement être la tension superficielle. Afin de le vérifier, une analyse quantitative et une modélisation ont été nécessaires.



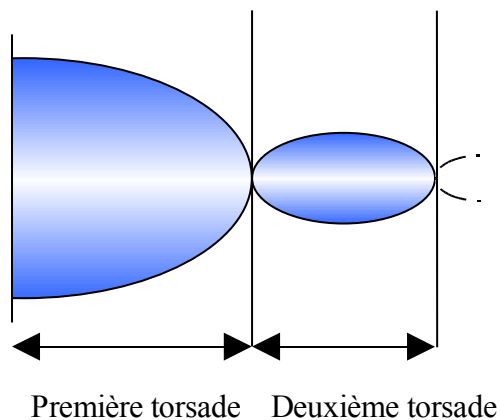
Observations

Lorsque l'eau s'écoule, on remarque un certain nombre de phénomènes récurrents :

- au début de l'écoulement, l'eau prend toujours une forme de torsades triangulaires. En effet, l'eau forme au départ un ruban assez étiré qui a tendance par la suite à devenir de plus en plus compact. L'eau semble ainsi converger vers un même point.



- on assiste aussi à un phénomène de rebonds. L'eau ne se contente pas de former une unique torsade mais plusieurs les unes à la suite des autres. Celles-ci forment de plus des angles de 90° les unes par rapport aux autres.



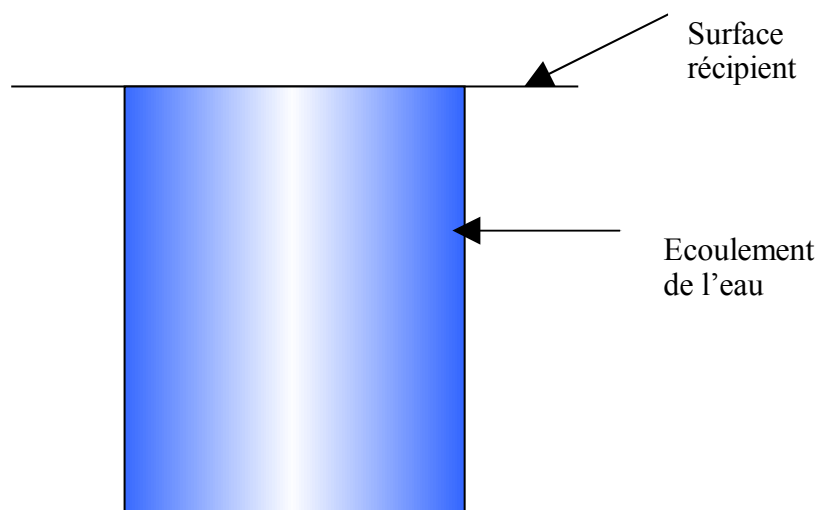
Torsades sur un écoulement d'eau à partir d'un récipient

- à partir d'une certaine vitesse ou en fonction de la largeur du récipient d'où l'eau s'écoule, on observe un phénomène de collé. En effet l'eau, au lieu de former un ruban qui s'éloigne de la bouteille, reste collée à la paroi du récipient.



Eau « collant » au verre

A priori, on pourrait croire que lors d'un écoulement sans collé l'eau va prendre la forme d'un ruban qui aurait la caractéristique de garder continuellement une même largeur, comme sur le schéma suivant. Or on observe un phénomène de convergence avec les torsades triangulaires, l'eau semble converger vers un même point et donc, de fait, vouloir présenter une surface de contact minimale avec l'air, ce qui est le propre de la force de tension superficielle.



La tension superficielle

I Qu'est-ce que la tension superficielle ?

La tension superficielle est une force s'exerçant sur un liquide (dans notre cas l'eau) qui l'incite à diminuer sa surface de contact avec l'air et à avoir davantage d'affinités avec lui-même. L'intensité de la force de tension superficielle est proportionnelle à un indice appelé "indice de tension superficielle", noté γ , ainsi qu'à la longueur l de l'objet avec lequel il interagit : $F = \gamma l$.

II Quelques expériences sur le phénomène de tension superficielle

Nous avons trouvé plusieurs expériences permettant de prouver la présence de la tension superficielle dans les liquides.

1) Le savon

Avec de l'eau savonneuse, il existe plusieurs expériences permettant de voir les effets de la tension superficielle.

- Lorsque l'on plonge un petit rectangle de métal dans de l'eau savonneuse, une "bande" d'eau est alors tendue.



Rectangle et ficelle

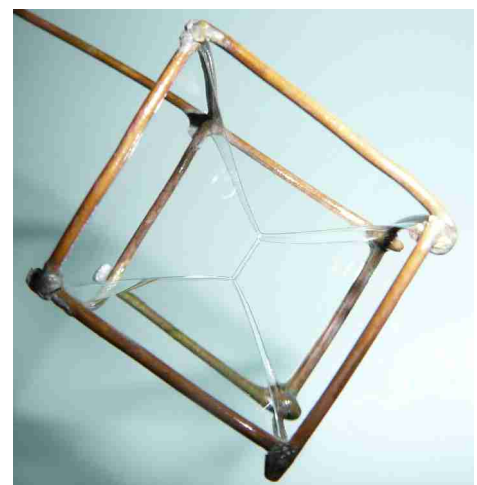


Rectangle et tige mobile

- Si l'on prend un modèle de rectangle de métal équipé d'une ficelle en son milieu, la ficelle sera au milieu du rectangle, tendue par les deux "bandes" séparées par la ficelle. Si l'on perce l'une des deux "bandes", la ficelle sera attirée vers le côté qui ne sera pas percé.
- Une autre expérience consiste à prendre un rectangle de métal auquel on retire un côté

que l'on remplace par une petite tige de métal mobile. Si l'on plonge cet ensemble dans du savon, la petite tige de métal est attirée vers l'intérieur : il y a donc présence d'une force diminuant la surface de contact avec l'air.

- Enfin, si l'on prend un cube et qu'on le plonge entièrement dans du savon, les parois du cube ne seront pas recouvertes par le savon, mais le savon s'installera de telle sorte que sa surface totale de contact avec l'air soit la plus petite.



Cube plongé dans de l'eau savonneuse

2) Le verre « plus que plein »

Cette expérience consiste à remplir un verre « à ras bord », puis de continuer légèrement de le remplir. Nous obtenons alors le résultat ci-contre.

Intuitivement, on pourrait penser que le verre déborderait, mais ce n'est pas le cas. L'eau se bombe légèrement, comme si elle était retenue par une « peau ». C'est la tension superficielle qui joue le rôle de cette « peau », en retenant l'eau de tomber, mais cette force ne s'applique pas pour un trop grand volume d'eau, d'où le nom de « tension superficielle ».



Verre « plus que plein »

3) Le bateau

Alors que nous avons démontré la présence de cette force de tension superficielle, nous avons également trouvé cette expérience qui utilise la tension superficielle. Dans un cristalliseur (ou un saladier) rempli d'eau, on place un petit bateau de polystyrène (ou de n'importe quelle matière qui flotte). Ce bateau ne bouge pas. Par contre, si l'on place du savon liquide sur l'arrière du bateau, il se met à avancer. Ce phénomène est un résultat de la différence de l'indice de tension superficielle entre le savon et l'eau, celui du savon étant plus faible, comme sur le schéma ci-dessous présentant, à gauche le bateau sans savon, et à droite, le bateau avec savon.

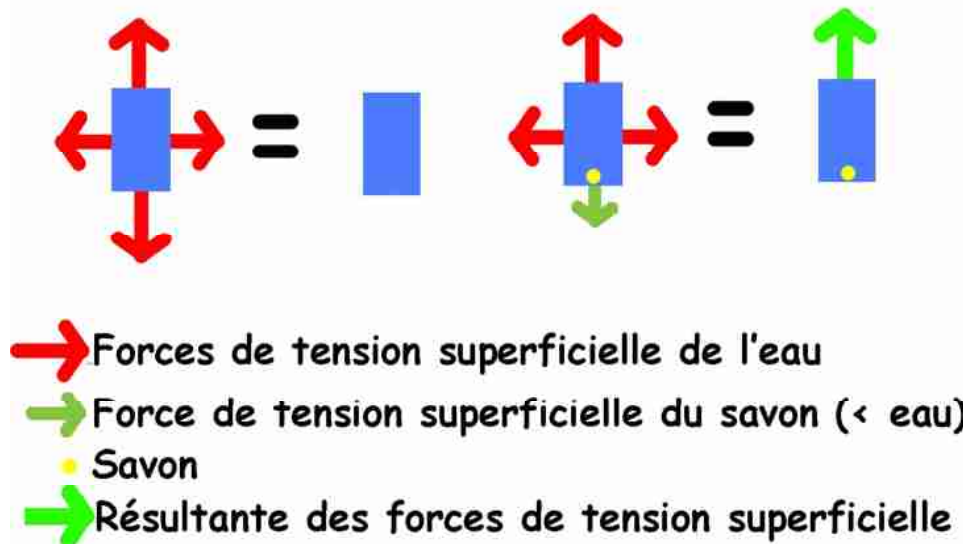


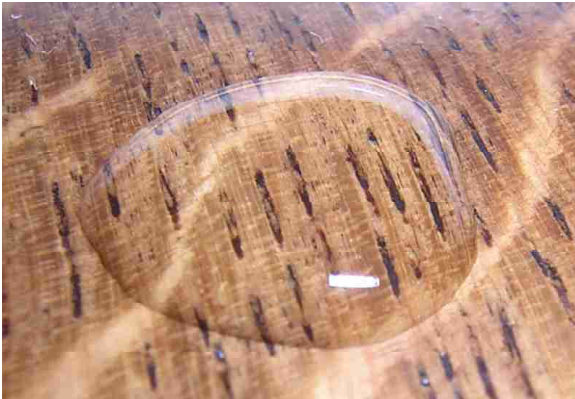
Schéma représentant l'expérience du bateau

III Quelques conséquences de la tension superficielle observables quotidiennement

La tension superficielle, n'est pas seulement une force dont les effets sont observables par des expériences. Elle est responsable de la formation de gouttes de pluie sur une table après une averse, ou de gouttelettes de rosée sur les feuilles, par exemple.



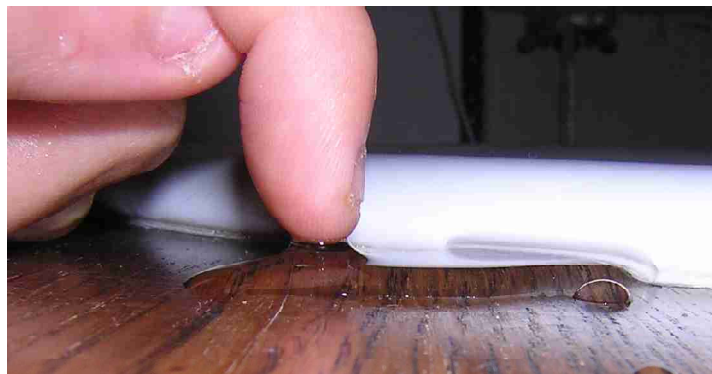
Goutte de rosée sur une feuille



Goutte d'eau sur une table

L'eau forme une goutte qui semble retenue par une « peau », semblable à celle observée dans l'expérience du verre « plus que plein ».

La tension superficielle peut également agir lorsque l'on met un doigt sur une goutte d'eau, comme ceci :



L'eau « colle » au doigt

L'eau « colle » au doigt, sous l'effet de la tension superficielle.



La forme d'une bulle de savon est liée à la tension superficielle

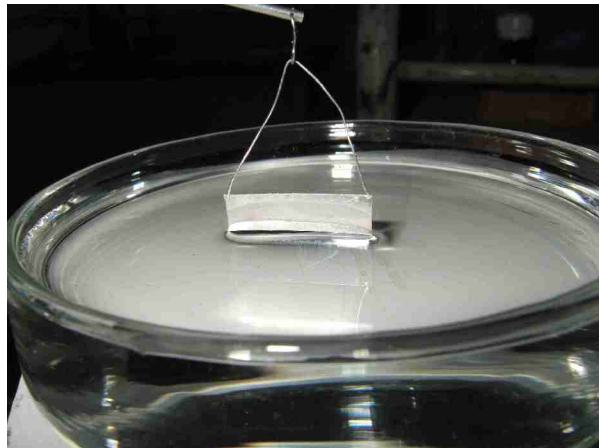
IV Comment mesurer la tension superficielle ?

1) L'appareil de mesure par arrachement

La tension superficielle se mesure par une méthode dite « par arrachement ». Elle se fait grâce à un appareil du même nom, composé d'un manche télescopique, au bout duquel se trouve un petit rectangle de métal, de base à longueur connue et de largeur très petite (donc négligeable), ainsi qu'un panneau gradué noté en dynes (unité de force dans un système utilisant les g et les cm, ainsi 1 dyne = 10^{-5} N). L'appareil émet une petite lumière sur le panneau.



Appareil de mesure de la tension superficielle par arrachement



Vue de près de la lamelle

2) Étalonnage de l'appareil

On procède alors à un étalonnage à l'aide de la valeur du poids à vide : 0, puis à celui d'un objet de masse connue attaché au manche. Quand l'étalonnage est effectué, il ne reste qu'à mesurer la force de tension superficielle en trempant l'objet de métal dans le liquide que l'on désire mesurer, à descendre le support élévateur sur lequel le récipient contenant le liquide est placé jusqu'à ce que le rectangle de métal ne soit plus retenu par le liquide.

3) Obtention de l'indice de tension superficielle

La dernière valeur obtenue sur le panneau est donc la valeur de la force de tension superficielle à retenir. Mais, pour nos expériences, c'est l'indice de tension superficielle γ qui nous intéresse. Nous pouvons alors l'obtenir grâce à cette formule :

$$F = 2\gamma l \quad \text{avec } F \text{ la valeur de la force mesurée, et } l \text{ la longueur de l'objet}$$

Le facteur 2 apparaît parce que l'eau touche l'objet des deux côtés.

Étant donné que l , est connu ($l = 2,05 \text{ cm}$) et que F a été mesurée, on peut alors connaître la valeur de l'indice de tension superficielle : $\gamma = \frac{F}{2l}$. Ainsi, on a :

- pour l'eau normale : $F = 268 \text{ dyn} \Rightarrow \gamma = 0,065 \text{ N.m}^{-1}$
- pour l'eau savonneuse : $F = 110 \text{ dyn} \Rightarrow \gamma = 0,027 \text{ N.m}^{-1}$

Mesures et exploitation

Nous avons fait une analyse quantitative des longueurs de la première torsade et des causes du collé. Nous avons également tenté de proposer un modèle théorique pour chacun de ces phénomènes.

I Les torsades

1) Avec de l'eau et des bouteilles



Bouteille percée

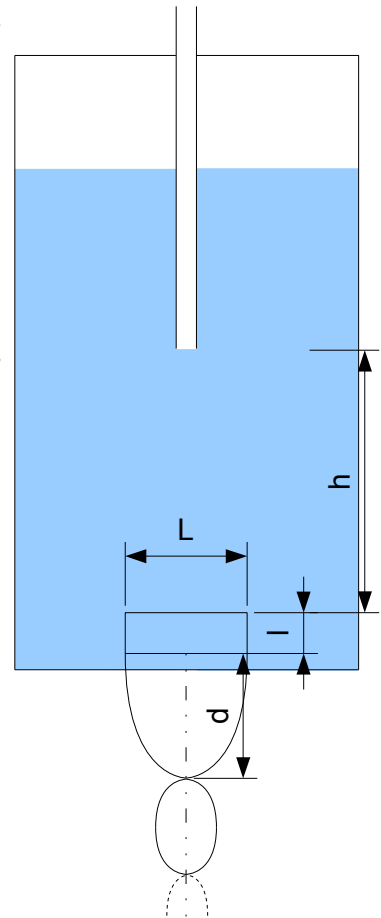
Nous avons décidé, pour analyser les torsades et plus particulièrement la longueur de la première, d'utiliser des bouteilles percées par le bas d'un trou rectangulaire de largeur l et de longueur L données. Nous savons que la vitesse à la sortie du trou, si l'aire du trou est très inférieure à l'aire de la base de la bouteille, est donnée par la formule :

$$v = \sqrt{2gh}$$

avec :

- v la vitesse de l'eau ($m.s^{-1}$)
- g l'intensité de la pesanteur ($9,81 m.s^{-2}$)
- h la distance entre le trou et l'endroit où est appliquée la pression atmosphérique (m)

Pour obtenir une vitesse constante, nous avons utilisé une paille verticale insérée dans le bouchon de la bouteille et qui permet de descendre l'endroit où est appliquée la pression atmosphérique.



Mesure de la première torsade d'une bouteille

2) Mesures et temps crunch

Nous avons donc fait des mesures pour des largeurs et des hauteurs de trous différents et à des vitesses différentes de l'eau en sortie de trou. Les mesures sont en annexe 1.

Nous avons constaté que le temps que met l'eau à former la première torsade est constant pour une hauteur et une largeur de trou donné. En référence au Big Crunch de la théorie du Big Bang, nous avons appelé ce temps le temps crunch (en secondes) :

$$t_c = \frac{d}{v}$$

3) Modèle théorique

Nous avons ensuite tenté de construire un modèle théorique, en négligeant toutes les forces devant la tension superficielle qui nous semblait être la force majeure. Voici ce modèle :

Considérons une bandelette d'eau de largeur δ .

Négligeons toutes les forces sauf celle de la tension superficielle.

L'énergie potentielle liée à la tension superficielle E_p se transforme en énergie cinétique E_c : $\Delta E_c = -\Delta E_p$

$$-\Delta E_p = 2\gamma S \text{ et } \Delta E_c = \frac{1}{2}mv_c^2 \text{ avec :}$$

- v_c la vitesse finale des particules d'eau du bord du jet vers le centre
- $m = Ll\delta\mu$ la masse de la bandelette d'eau
- $S = L\delta$ la surface de la bandelette d'eau

D'où :

$$v_c = \sqrt{\frac{4\gamma L\delta}{Ll\delta\mu}} = 2\sqrt{\frac{\gamma}{l\mu}}$$

En considérant que v_c est approximativement la vitesse moyenne des particules du bord de la bandelette vers l'intérieur, on a :

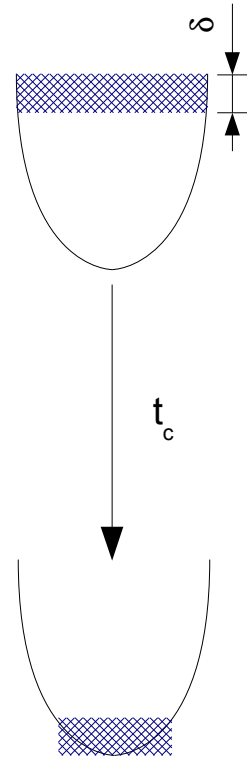
$$v_c \approx \frac{L}{2t_c}$$

D'où :

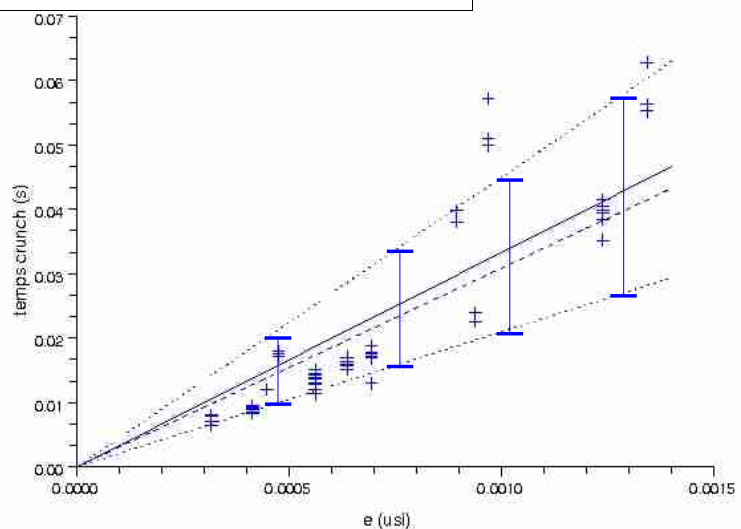
$$\frac{L}{2t_c} = 2\sqrt{\frac{\gamma}{l\mu}}$$

Donc :

$$t_c = \frac{1}{4}\sqrt{\frac{\mu}{\gamma}}L\sqrt{l} \text{ avec } \frac{1}{4}\sqrt{\frac{\mu}{\gamma}} = cte \text{ et notons } L\sqrt{l} = e$$



Ce modèle nous indique une proportionnalité entre $e = L\sqrt{l}$ et t_c . Nous remarquons que le graphes de t_c en fonction de e , d'après nos valeurs expérimentales est une droite passant par l'origine, ce qui confirme le modèle.



Graphe 1: t_c (s) en fonction de e (usi)

Le calcul du coefficient de proportionnalité cte nous donne ceci (avec $\gamma = 0.65 \text{ N.m}^{-1}$) :

- $cte = 31 \text{ usi}$ en théorie
- $cte = 33 \pm 12 \text{ usi}$ expérimentalement

Les résultats expérimentaux sont proches de la théorie ce qui semble confirmer le modèle. Cependant, nous avons voulu vérifier davantage ce modèle en utilisant à la place de l'eau, un liquide dont la tension superficielle serait très différente. Nous avons pour cela utilisé de l'eau savonneuse.

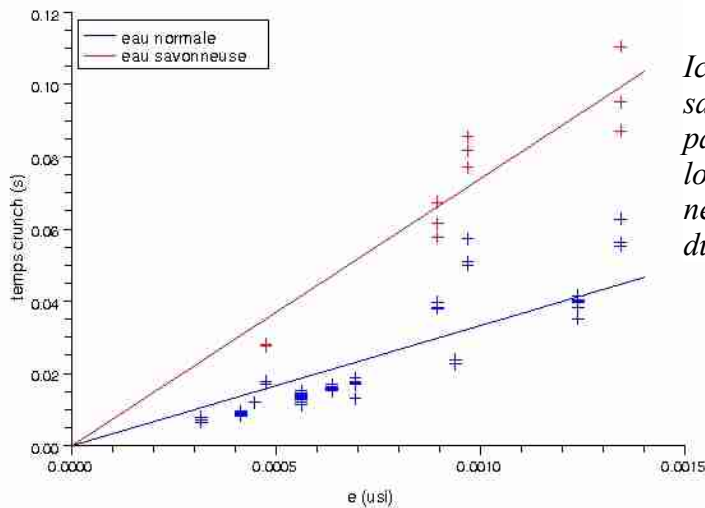
4) Avec de l'eau savonneuse

Nous avons refait une série de mesures avec de l'eau savonneuse et nous avons obtenu les résultats présentés en annexe 2.

t_c est aussi proportionnel à e , ce qui est en conformité avec le modèle théorique.



Mesure de la longueur de la première torsade avec de l'eau savonneuse.



Graphe 2: t_c (s) en fonction de e (usi)

Ici, mise à part le fait que l'on utilise de l'eau savonneuse, tout est pareil à l'illustration page 10. On peut donc déjà voir que la longueur des torsades d'eau savonneuse est nettement plus importante que celles d'eau du robinet.

Soient :

- D la longueur de la première torsade avec de l'eau normale
- d la longueur de la première torsade avec de l'eau savonneuse
- t_c le temps crunch de l'eau normale
- t_c' le temps crunch de l'eau savonneuse
- μ la masse volumique de l'eau normale
- μ' la masse volumique de l'eau savonneuse
- γ la tension superficielle de l'eau normale
- γ' la tension superficielle de l'eau savonneuse

Nous avons remarqué que pour un trou et une vitesse donnés : $\frac{d}{D} \approx 1,6$ et nous avons mesuré que :

- $\mu = \mu' = 1,00 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$
- $\gamma = 0,065 \text{ N.m}^{-1}$
- $\gamma' = 0,027 \text{ N.m}^{-1}$

D'après le modèle théorique précédent, nous devrions avoir, pour le rapport $\frac{d}{D}$:

$$\frac{d}{D} = \frac{v t_c}{v t_c'} = \frac{t_c}{t_c'}$$

$$\text{Or } t_c = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\mu}{\gamma}} L \sqrt{l} \text{ et } t_c' = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\mu}{\gamma'}} L \sqrt{l}$$

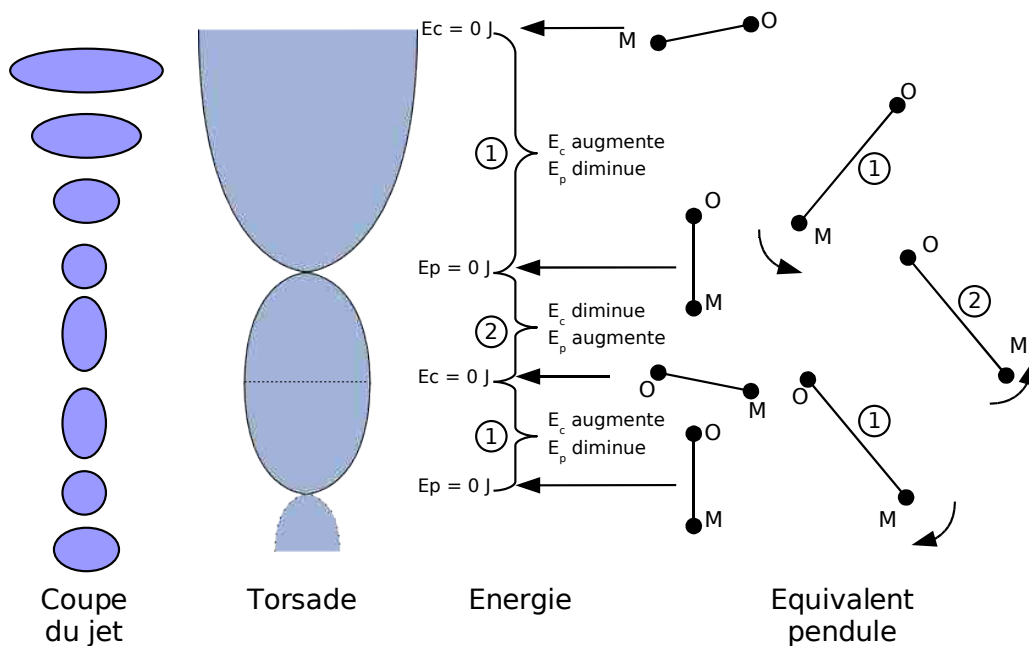
$$\text{Donc } \frac{d}{D} = \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma'}}$$

Or : $\sqrt{\frac{\gamma}{\gamma'}} = 1,6 \approx \frac{d}{D}$ ce qui confirme encore le modèle théorique.

5) Les autres torsades...

En ce qui concerne le fait que d'autres torsades apparaissent, nous avons pensé que cela est similaire au comportement d'un pendule :

1. Tout d'abord, l'énergie potentielle E_p se transforme en énergie cinétique E_c jusqu'à ce que $E_p = 0$ (formation de la première torsade et de la fin de toutes les suivantes)
2. Ensuite, l'énergie cinétique $E_c = 0$ acquise se transforme en énergie potentielle E_p jusqu'à ce que $E_c = 0$ (formation du début de toutes les torsades à partir de la seconde)



Analogie entre des torsades et un pendule oscillant

Le comportement d'un pendule de point fixe O et de point mobile M semble correspondre à celui des torsades. Il reste cependant encore une question : pourquoi les torsades sont-elles perpendiculaires les unes par rapport aux autres ?

Nous pensons que ce phénomène est lié au fait que les particules de fluide ne peuvent pas, en vérité, diminuer de taille. Donc entre deux torsades, le jet ne se résume pas en un point mais en un cercle dont le rayon est supérieur à l . Les particules d'eau ne font donc pas que se déplacer dans le plan du jet mais également se déplacent vers le haut ou vers le bas du jet comme le montre le schéma ci-contre (les flèches symbolisent le déplacement des particules de fluide).

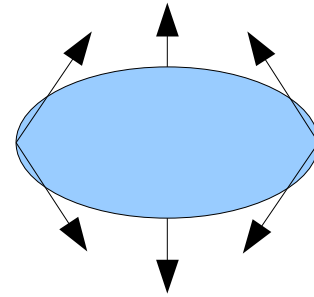


Schéma des déplacements des particules d'eau dans une torsade (coupe transversale)

On obtient ainsi des torsades perpendiculaires les unes par rapport aux autres et des coupes transversales de torsades comme sur le schéma de la page précédente.

Cependant, nous n'obtenons pas une seconde torsade deux fois plus grande que la première comme on pourrait s'y attendre s'il n'y a pas de perte d'énergie. Il semble donc qu'il y ait une perte d'énergie notamment à cause de la viscosité de l'eau.

Après nous être intéressés aux torsades nous avons analysé la raison pour laquelle l'eau colle aux bords de certains récipients.

II Le collé

1) Encore des bouteilles verticales

Nous avons réutilisé nos bouteilles et nous avons mesuré, pour un trou de dimensions fixées, à partir de quelle vitesse l'eau ne colle plus au récipient même lorsqu'on la force avec le doigt à se coller. Les résultats ont été reportés en annexe 3.

Nous avons ensuite cherché un modèle théorique et nous avons trouvé celui de la page suivante.

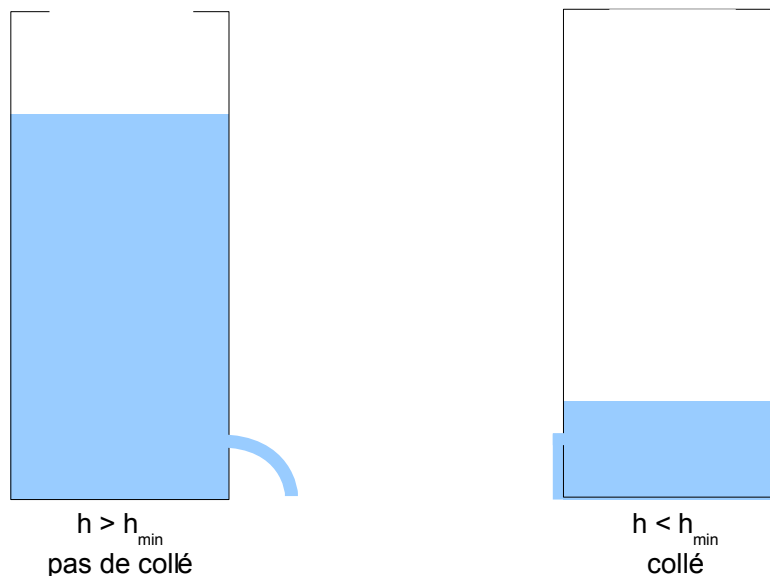


Schéma montrant deux bouteilles : l'une avec collé et l'autre sans

2) Modèle théorique

Puisque nous forçons l'eau à se coller, pourquoi, à partir d'une certaine vitesse, ne se colle-t-elle plus à la bouteille ?

Considérons une bandelette d'eau de largeur δ et négligeons toutes les forces devant celle de la tension superficielle.

Pour que cette bandelette ne colle pas à la bouteille, il faut que l'énergie cinétique de l'eau à la sortie de la bouteille (E_c) (si l'eau ne collait pas) soit supérieure à l'énergie qu'il faut pour décoller l'eau de la bouteille, autrement dit supérieure à la différence entre l'énergie nécessaire pour former une interface air-eau (de tension superficielle γ) et une interface air-bouteille (γ_{SV}) et l'énergie nécessaire à la création d'une interface eau-bouteille (γ_{SL}). Cette énergie est l'énergie potentielle de la tension superficielle nécessaire au décolllement (E_p).

Pour que l'eau ne colle pas, il faut et il suffit donc que :

$$E_c > E_p$$

Or $E_p = (\gamma + \gamma_{SV} - \gamma_{SL})S$ et $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ avec :

- v la vitesse de l'eau à la sortie de la bouteille s'il n'y avait pas de collé
- $m = Ll\delta\mu$ la masse de la bandelette d'eau
- $S = L\delta$ la surface de la bandelette d'eau

D'où :

$$E_c > E_p$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{2}Ll\delta\mu v^2 > (\gamma + \gamma_{SV} - \gamma_{SL})L\delta$$

$$\Leftrightarrow v^2 > \frac{2(\gamma + \gamma_{SV} - \gamma_{SL})}{l\mu}$$

$$\Leftrightarrow v > \sqrt{2 \frac{\gamma + \gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\mu}} \sqrt{\frac{1}{l}} \quad \text{avec} \quad \sqrt{2 \frac{\gamma + \gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\mu}} = cte$$

Avant de vérifier le modèle, il convient de calculer $\gamma + \gamma_{SV} - \gamma_{SL}$. Il n'existe malheureusement aucune valeur théorique pour γ_{SV} et γ_{SL} . En revanche, il existe un moyen simple dans notre cas de mesurer :

$\gamma_{SV} - \gamma_{SL}$. Il s'agit de mesurer l'angle Θ que forme la « pente » de la bulle d'eau sur une bouteille avec le plastique de cette bouteille conformément au schéma ci-contre.

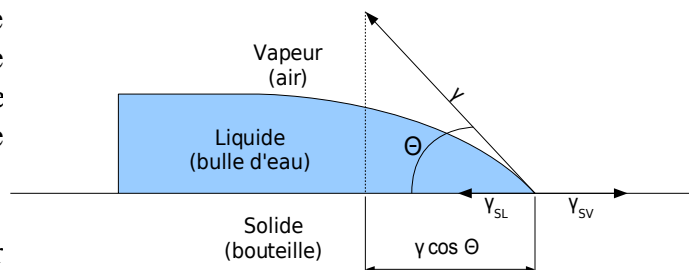


Schéma d'une bulle d'eau et des forces de tension superficielle

Comme la somme des forces est nulle (la bulle est en équilibre) : $\gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \gamma \cos \Theta$

Nous avons pris quelques photographies de bulles et nous avons trouvé : $45^\circ < \Theta < 70^\circ$

Considérons maintenant la vitesse minimale de l'eau pour qu'il n'y ait pas décollé v_m .

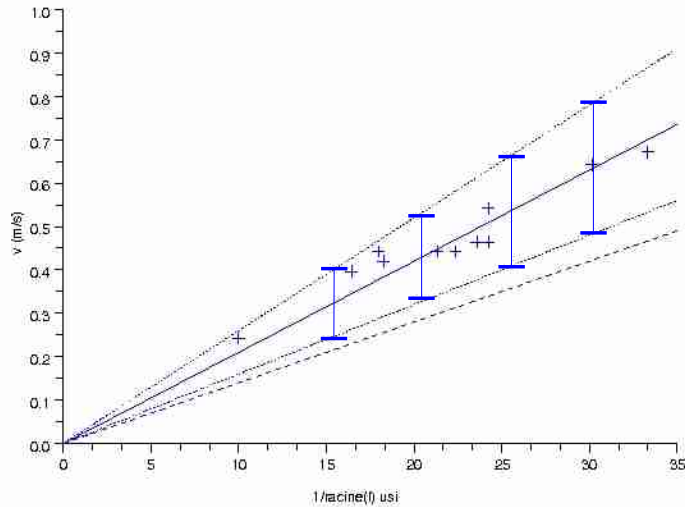
D'après le modèle théorique (courbe en pointillés) :

$$v_m = 0,014 \sqrt{\frac{1}{l}}$$

D'après nos expériences, on a :

$$v_m = 0,021 \pm 0,005 \sqrt{\frac{1}{l}}$$

L'écart entre le modèle et les valeurs expérimentales est assez important. De plus, il semblerait, que la courbe de v en fonction de $\frac{1}{\sqrt{l}}$ soit bien une droite mais ne passant pas par l'origine.



Grappe 3: v (m/s) en fonction de $1/\text{racine}(l)$ (usi)

On aurait alors : $v_m = \frac{a}{\sqrt{l}} + b$ avec a constant et b soit constant soit variant peu.

En ne forçant pas la droite à passer par l'origine, on a :

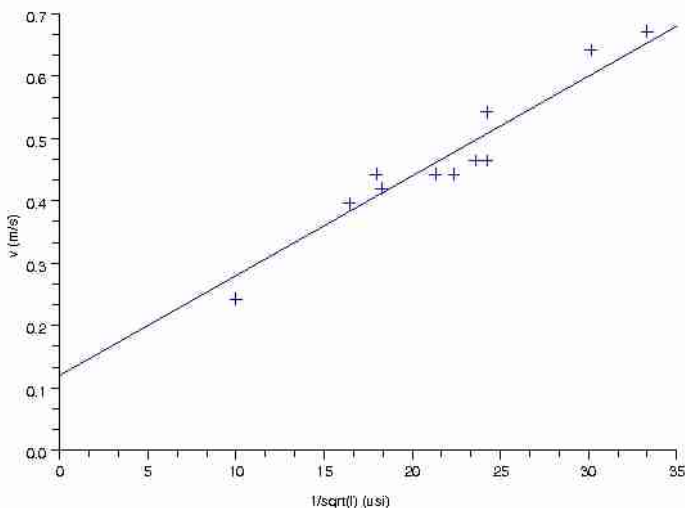
- $a \approx 0.017 \text{ usi}$
- $b \approx 0.12 \text{ usi}$

Ainsi, a semble plus proche du modèle.

D'où vient alors cette ordonnée à l'origine ?

Nous n'avons pas trouvé de modèle théorique mais nous avons cependant deux hypothèses non exclusives :

- une différence de pression de chaque côté du jet engendrée par le fait qu'il est courbe. Cette différence plaquerait alors le jet sur la bouteille.



Grappe 4: v (m/s) en fonction de $1/\text{racine}(l)$ (usi)

- la deuxième torsade pourrait également jouer un rôle. En effet, comme elle est perpendiculaire à la première, elle peut toucher la bouteille.

Conclusion

L'écoulement de l'eau est donc un phénomène très intéressant. L'existence des torsades lors de l'écoulement peut s'expliquer principalement par l'existence de la force de tension superficielle à la surface du liquide. Par un trou rectangulaire, la longueur de la première torsade dépend donc principalement des dimensions du trou d'où l'eau s'écoule et de la vitesse de l'eau. Les causes du collé semblent, quant à elles, plus complexes. En effet la tension superficielle ne suffit pas, à elle seule, à le justifier.

Cette tentative d'explication de deux phénomènes physiques grâce à une étude mêlant analyse quantitative et une possible modélisation a donc été très enrichissante pour nous pour plusieurs raisons. Elle nous a permis de découvrir et de commencer à bien appréhender une force que nous ne connaissions pas, la tension superficielle et même, plus largement, d'avoir un aperçu de ce qui constitue la mécanique des fluides. De plus, cela nous a permis d'entrevoir ce qu'est le monde de la recherche expérimentale.

Ce dossier a été réalisé par Xavier Le Gall, Philippe-Henri Blais et Fabrice Benhamouda, élèves de terminale, avec l'aide du chercheur M. Reyssat et des professeurs de Physique Chimie M^{me} Larasse et M. Brasselet, dans le cadre de la toute nouvelle association l'APELH : « Atelier de Physique Expérimentale du Lycée Hoche ».

Nous avons décidé de participer aux Olympiades en première sur le thème de l'écoulement de l'eau parce que nous nous y intéressions. De façon à mieux nous y préparer, nous avons participé au concours Quintesciences en présentant une ébauche de ce travail.

Annexe 1 - Mesure de la longueur de la première torsade

Dimensions du trou		Hauteur d'eau	Longueur torsade	Vitesse à la sortie du trou	"Temps crunch"	$e = L \times \sqrt{l}$
Longueur L (m)	Largeur l (m)	h (m)	d (m)	$v = \sqrt{2gh}$ (m.s ⁻¹)	t _c (s)	e (m ^{3/2})
0,0100	0,0010	0,040	0,007	0,886	0,0079	3,16.10 ⁻⁴
0,0100	0,0010	0,060	0,007	1,09	0,0065	3,16.10 ⁻⁴
0,0100	0,0010	0,080	0,010	1,25	0,0080	3,16.10 ⁻⁴
0,0100	0,0010	0,100	0,010	1,40	0,0071	3,16.10 ⁻⁴
					t_{c moy}=7,4 ms	
0,0100	0,0017	0,040	0,008	0,886	0,0090	4,12.10 ⁻⁴
0,0100	0,0017	0,050	0,009	0,990	0,0091	4,12.10 ⁻⁴
0,0100	0,0017	0,060	0,009	1,09	0,0083	4,12.10 ⁻⁴
0,0100	0,0017	0,070	0,010	1,17	0,0085	4,12.10 ⁻⁴
0,0100	0,0017	0,080	0,011	1,25	0,0088	4,12.10 ⁻⁴
0,0100	0,0017	0,090	0,012	1,33	0,0090	4,12.10 ⁻⁴
0,0100	0,0017	0,100	0,013	1,40	0,0093	4,12.10 ⁻⁴
0,0100	0,0017	0,110	0,014	1,47	0,0095	4,12.10 ⁻⁴
0,0100	0,0017	0,120	0,014	1,53	0,0091	4,12.10 ⁻⁴
0,0100	0,0017	0,130	0,015	1,60	0,0094	4,12.10 ⁻⁴
					t_{c moy}=9,0 ms	
0,0150	0,0014	0,030	0,010	0,767	0,0130	5,61.10 ⁻⁴
0,0150	0,0014	0,040	0,010	0,886	0,0113	5,61.10 ⁻⁴
0,0150	0,0014	0,050	0,012	0,990	0,0121	5,61.10 ⁻⁴
0,0150	0,0014	0,060	0,015	1,09	0,0138	5,61.10 ⁻⁴
0,0150	0,0014	0,070	0,015	1,17	0,0128	5,61.10 ⁻⁴
0,0150	0,0014	0,080	0,017	1,25	0,0136	5,61.10 ⁻⁴
0,0150	0,0014	0,090	0,020	1,33	0,0151	5,61.10 ⁻⁴
0,0150	0,0014	0,110	0,020	1,47	0,0136	5,61.10 ⁻⁴
0,0150	0,0014	0,120	0,022	1,53	0,0143	5,61.10 ⁻⁴
0,0150	0,0014	0,130	0,023	1,60	0,0144	5,61.10 ⁻⁴
					t_{c moy}=13,4 ms	
0,0150	0,0018	0,020	0,010	0,626	0,0160	6,36.10 ⁻⁴
0,0150	0,0018	0,040	0,015	0,886	0,0169	6,36.10 ⁻⁴

Dimensions du trou		Hauteur d'eau	Longueur torsade	Vitesse à la sortie du trou	"Temps crunch"	$e = L \times \sqrt{l}$
Longueur L (m)	Largeur l (m)	h (m)	d (m)	$v = \sqrt{2gh}$ (m.s ⁻¹)	t _c (s)	e (m ^{3/2})
0,0150	0,0018	0,080	0,020	1,25	0,0160	6,36.10 ⁻⁴
0,0150	0,0018	0,090	0,020	1,33	0,0151	6,36.10 ⁻⁴
0,0150	0,0018	0,100	0,022	1,40	0,0157	6,36.10 ⁻⁴
0,0150	0,0018	0,110	0,025	1,47	0,0170	6,36.10 ⁻⁴
0,0150	0,0018	0,120	0,025	1,53	0,0163	6,36.10 ⁻⁴
					t_{c moy}=16,1 ms	
0,0100	0,0020	0,080	0,015	1,25	12 ms	4,47.10 ⁻⁴
0,0150	0,0010	0,103	0,025	1,42	0,0176	4,74.10 ⁻⁴
0,0150	0,0010	0,132	0,028	1,61	0,0171	4,74.10 ⁻⁴
0,0150	0,0010	0,162	0,032	1,78	0,0179	4,74.10 ⁻⁴
					t_{c moy}=17,5 ms	
0,0200	0,0012	0,030	0,010	0,767	0,0130	6,93.10 ⁻⁴
0,0200	0,0012	0,040	0,015	0,886	0,0169	6,93.10 ⁻⁴
0,0200	0,0012	0,050	0,017	0,991	0,0172	6,93.10 ⁻⁴
0,0200	0,0012	0,060	0,019	1,09	0,0175	6,93.10 ⁻⁴
0,0200	0,0012	0,070	0,020	1,17	0,0171	6,93.10 ⁻⁴
0,0200	0,0012	0,080	0,022	1,25	0,0176	6,93.10 ⁻⁴
0,0200	0,0012	0,090	0,025	1,33	0,0188	6,93.10 ⁻⁴
0,0200	0,0012	0,100	0,025	1,40	0,0178	6,93.10 ⁻⁴
					t_{c moy}=17,0 ms	
0,0200	0,0020	0,103	0,054	1,42	0,0380	8,94.10 ⁻⁴
0,0200	0,0020	0,132	0,064	1,61	0,0398	8,94.10 ⁻⁴
0,0200	0,0020	0,162	0,068	1,78	0,0381	8,94.10 ⁻⁴
					t_{c moy}=38,6 ms	
0,0200	0,0022	0,040	0,020	0,886	0,0226	9,38.10 ⁻⁴
0,0200	0,0022	0,080	0,030	1,25	0,0239	9,38.10 ⁻⁴
					t_{c moy}=23,3 ms	
0,0250	0,0015	0,103	0,071	1,42	0,0499	9,68.10 ⁻⁴
0,0250	0,0015	0,132	0,082	1,61	0,0510	9,68.10 ⁻⁴
0,0250	0,0015	0,162	0,102	1,78	0,0572	9,68.10 ⁻⁴
					t_{c moy}=52,7 ms	
0,0300	0,0017	0,040	0,035	0,886	0,0395	1,237.10 ⁻³

Dimensions du trou		Hauteur d'eau	Longueur torsade	Vitesse à la sortie du trou	"Temps crunch"	$e = L \times \sqrt{l}$
Longueur L (m)	Largeur l (m)	h (m)	d (m)	$v = \sqrt{2gh}$ (m.s ⁻¹)	t _c (s)	e (m ^{3/2})
0,0300	0,0017	0,050	0,040	0,991	0,0404	1,237.10 ⁻³
0,0300	0,0017	0,060	0,045	1,09	0,0415	1,237.10 ⁻³
0,0300	0,0017	0,070	0,045	1,17	0,0384	1,237.10 ⁻³
0,0300	0,0017	0,080	0,050	1,25	0,0399	1,237.10 ⁻³
					t_{c moy}=39,1 ms	
0,0300	0,0020	0,103	0,080	1,42	0,0563	1,342.10 ⁻³
0,0300	0,0020	0,132	0,089	1,61	0,0553	1,342.10 ⁻³
0,0300	0,0020	0,162	0,112	1,78	0,0628	1,342.10 ⁻³
					t_{c moy}=58,1 ms	

Annexe 2 - Comparaison, eau – eau savonneuse

Hauteur paille (cm)	Longueur fente (cm)	Largeur fente (cm)	Longueur torsade D (cm) Eau normale	Longueur torsade d (cm) Eau savonneuse	Rapport $\frac{d}{D}$	Vitesse (m.s ⁻¹)	Temps crunch T (s) Eau normale	Temps crunch † (s) eau savonneuse
10,3	1,5	0,10	2,5	4,0	1,6	1,42	0,017	0,028
13,2	1,5	0,10	2,75	4,5	1,6	1,61	0,017	0,028
16,2	1,5	0,10	3,2	4,9	1,5	1,78	0,018	0,028
10,3	2,0	0,20	5,4	8,2	1,5	1,42	0,038	0,058
13,2	2,0	0,20	6,4	9,9	1,5	1,61	0,040	0,061
16,2	2,0	0,20	6,8	12,0	1,8	1,78	0,038	0,067
10,3	2,5	0,15	7,1	11,6	1,6	1,42	0,050	0,082
13,2	2,5	0,15	8,2	12,4	1,5	1,61	0,051	0,077
16,2	2,5	0,15	10,2	15,25	1,5	1,78	0,057	0,086
10,3	3,0	0,20	8,0	12,4	1,6	1,42	0,056	0,087
13,2	3,0	0,20	8,9	15,3	1,7	1,61	0,055	0,095
16,2	3,0	0,20	11,2	19,7	1,8	1,78	0,063	0,111

Annexe 3 – Vitesse à partir de laquelle apparaît le collé

Dimensions du trou		Hauteur minimale de l'eau	Vitesse minimale de l'eau
Longueur L (m)	Largeur l (m)	h (m)	$v_m = \sqrt{2gh}$ (m.s ⁻¹)
0,005	0,0010	0,003	0,243
0,010	0,0017	0,015	0,542
0,010	0,0020	0,010	0,443
0,010	0,0037	0,008	0,396
0,015	0,0009	0,023	0,672
0,015	0,0018	0,011	0,465
0,015	0,0030	0,009	0,420
0,020	0,0011	0,021	0,642
0,020	0,0022	0,010	0,443
0,020	0,0031	0,010	0,443
0,030	0,0017	0,011	0,465