
Des gouttes rebondissantes

Préparé pour : Olympiades de Physique

Préparé par : Louis Arranz, Guillaume Frenca et Adrien Lagouge

Date : 09/12/2009



Sommaire

Introduction

I Qu'est ce qu'une goutte ?

- 1) Notions de base
 - a) La forme
 - b) La taille
- 2) La tension superficielle
 - a) Expériences
 - b) Définition et propriétés
 - c) Origine microscopique de la tension superficielle

II Mouillage des gouttes et hydrophobies

- 1) Mouillage des gouttes
- 2) Hydrophobie et Hydrophilie

III Le rebond des gouttes

- 1) Comment une goutte peut-elle rebondir ?
- 2) Propriétés des rebonds de gouttes
- 3) Analogie Goutte/Ressort

Conclusion

IV Annexes

Introduction

Les gouttes d'eau sont partout autour de nous : sous la douche, quand il pleut... Cependant l'apparente simplicité de leur nature cache en réalité une multitude de phénomènes observables à tous les niveaux d'étude. Il nous est ainsi apparu très intéressant d'étudier la goutte d'eau dans son ensemble et au fil de nos recherches, nous avons découvert une particularité aussi surprenante que spectaculaire des gouttes, qui est leur faculté de rebondir comme des balles de tennis sous certaines conditions. C'est le côté assez incongru et inhabituel de ces rebonds de gouttes qui nous a d'abord séduits et nous avons décidé de comprendre plus en détail les paramètres qui les régissent. Après nos premières observations, nous avons rapidement compris que, dans tous ce qui concerne les gouttes et plus particulièrement les gouttes d'eau, la « tension superficielle » des liquides était une des grandeurs incontournables que nous devions absolument découvrir. En effet, au lycée, il n'est jamais fait allusion à ce genre de forces très particulières qui régissent pourtant beaucoup de phénomènes dont les manifestations sont quotidiennes.

Notre étude s'est donc tout d'abord portée sur les multiples propriétés des gouttes d'eau et notre démarche expérimentale nous a permis de mettre en lumière et de mieux percevoir les nombreux événements qui peuvent apparaître lors du rebond d'une goutte.

I) Qu'est ce qu'une goutte ?

1) Notions de base

a) La forme

Au niveau macroscopique la forme d'une goutte d'eau n'est pas réellement observable. En effet dans la vie de tous les jours une goutte d'eau est représentée au même titre qu'une larme par un simple trait. Cette simplification de la goutte d'eau s'avère en réalité totalement fautive. Lorsqu'on étudie la chute d'une goutte d'eau à l'aide d'une webcam, nous pouvons ainsi nous rendre compte qu'une goutte est parfaitement ronde.

La goutte d'eau va maintenir cette forme de sphère jusqu'à ce qu'un choc ne vienne la déformer. Sa forme sera alors au début totalement aléatoire mais tendra progressivement à redevenir une sphère quasi parfaite.

b) La taille

La taille d'une goutte est régie par de nombreux phénomènes physiques, qui entraînent que le diamètre d'une goutte ne pourra jamais dépasser 6 mm, et pour cause, car si les gouttes dépassaient cette limite, elles exploseraient d'un seul coup.

Nous allons expliquer un des aspects qui restreint la taille d'une goutte d'eau : admettons qu'une goutte soit très grosse (de diamètre supérieur à 6 mm). Cette goutte va être soumise à un poids plus grand qu'une goutte « classique ». La tension superficielle, force que nous détaillerons plus tard et qui oblige la goutte à rester sphérique, ne peut alors plus compenser les forces qui s'appliquent sur la goutte : celle-ci ne restera plus ronde et éclatera.

2) La tension superficielle

a) Expériences

Lorsqu'on essaie d'étirer une goutte, on observe que dès que la force imprimée à cette goutte cesse, celle-ci va tendre à redevenir sphérique sous l'effet d'une force inconnue.

Voici quelques expériences que nous avons menées afin de mettre en lumière cette force que l'on nomme « tension superficielle » et afin de mieux percevoir ses effets :

- Il faut tout d'abord remarquer un phénomène très simple et connu de tous qui est que lorsque l'on plonge un petit cadre métallique dans de l'eau savonneuse, un très mince film de savon est déposé sur les parois du cadre. Ce film persiste assez durablement une fois que l'on a ressorti le cadre de l'eau. Un exemple de film de savon est proposé ci-après :



- Nous avons ici formé un cadre avec des pailles et placé une autre paille au milieu de ce cadre de façon à ce qu'elle divise la surface du cadre en deux. Après avoir plongé le dispositif dans l'eau savonneuse, il se forme deux films de savon de part et d'autre de la paille centrale.

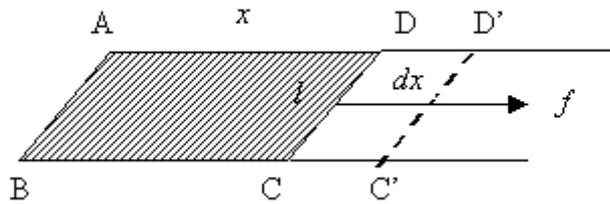


- En perçant l'un des deux films, on observe que le film non percé va très rapidement disparaître en tirant la paille centrale du côté où s'opère sa brève « rétractation ».



Une courte explication théorique, qui tiendra lieu de définition s'impose alors afin d'expliquer quelle est l'origine de ce phénomène surprenant.

b) Définition et propriétés :



http://pagesperso-orange.fr/patrick.kohl/surfaces/surf_4.htm

- On place un cadre métallique, avec une extrémité CD mobile, dans de l'eau savonneuse : un film se forme. La température et le volume du film sont constants.
- On remarque que cette lame a tendance à se rétracter : pour maintenir sa surface constante, il faut exercer sur CD une force notée \vec{F} . Ainsi, pour déplacer le côté CD d'une longueur dx (sans casser le film) il faut fournir le travail $\delta W = F \cdot dx$.
- Ce déplacement dx correspond à une variation d'aire $A = 2 \cdot l \cdot dx$. Le travail fourni par unité de surface sera donc : $\frac{\delta W}{dA} = \frac{F}{2l}$ constante, que l'on nommera « tension superficielle ». La tension superficielle a les dimensions d'une force que multiplie l'inverse d'une distance, ce qui équivaut au quotient d'une énergie par une surface.
- On a donc : $\frac{\delta W}{dA} = \gamma$, notation usuelle de la tension superficielle. Notons que la tension superficielle est fonction de la température, et des caractéristiques des deux milieux en présence (ici, l'eau savonneuse et l'air).
- La tension superficielle est aussi appelée tension de surface ou énergie d'interface et existe à l'interface de deux milieux différents : gaz/liquide, gaz/solide.

c) Origine microscopique de la tension superficielle : les forces de Van der Waals

La tension de surface est due aux forces d'attractions s'exerçant entre les molécules d'un liquide.

On considère que les molécules constituant un liquide sont également réparties au sein de ce dernier, si bien que la somme des forces s'exerçant entre ces molécules est nulle.

Ainsi, les forces s'exerçant sur une molécule « au centre » d'un liquide se compensent parfaitement. En revanche, les molécules à l'interface liquide/milieu extérieur (interface qui est considérée comme localement plane) ne subissent *grosso modo* que la moitié des forces intermoléculaires que reçoivent les molécules « entourées » d'autres.

D'autre part, dans ce que l'on pourrait nommer le « milieu extérieur », les forces intermoléculaires sont en général bien plus faibles, donc négligeables devant celles dues aux molécules du liquide en question. En d'autres termes, les molécules situées à une interface liquide /air, par exemple, vont être bien plus attirées par les molécules d'eau autour d'elles que par les molécules de gaz composant l'air. Les molécules situées à l'interface liquide/air sont donc moins stables que celles au centre du liquide qui ne sont soumises au total à aucune force résultante.

Le nombre de molécules énergétiquement moins avantageées va alors tendre à être minimisé, ce qui implique que le liquide prenne une forme telle que la surface liquide/air soit minimale. La force s'exerçant alors sur l'interface liquide/air et qui va permettre l'obtention et le maintien de cette surface minimale s'appelle la tension superficielle.

- Mais quelle est la nature exacte des forces (appelées forces de Van der Waals) s'exerçant entre les molécules d'un liquide ?

- Prenons le cas de l'eau :

Les molécules d'eau sont électriquement neutres. Cependant, le barycentre des charges positives G_+ ne correspond pas exactement au barycentre G_- des charges négatives. La molécule d'eau est dite polaire, et la grandeur $\mu = q \cdot G_-G_+$ est appelée moment dipolaire de la molécule (q étant une charge électrique). C'est ce moment dipolaire qui est la source d'interactions électromagnétiques attractives entre les molécules. En effet, on appelle force de Keesom les forces d'interaction entre deux dipôles dits permanents. La molécule d'eau est bien un dipôle permanent : son moment dipolaire n'est dû qu'à ses caractéristiques intrinsèques. Soient deux molécules d'eau possédant les moments dipolaires μ_1 et μ_2 et placées en O_1 et O_2 avec $O_1O_2 = r$. La direction de la force d'interaction entre ces deux dipôles dépend en fait de leur orientation relative, or on peut bien comprendre que les moments dipolaires (qui sont des vecteurs) ne sont pas forcément dans le même plan (μ_2 dans le plan de O_1O_2 et μ_1 par ex). De plus, l'agitation thermique des molécules perturbe sans cesse toute orientation. On fait donc correspondre la force d'interaction entre ces deux dipôles à la valeur moyenne de la force instantanée, ce qui donne une force d'interaction proportionnelle à $\frac{1}{r^3}$, cette force n'étant conséquente que pour deux molécules voisines, ce qui valide l'analyse faite précédemment pour expliquer l'origine de la tension superficielle.

- Cas d'une goutte :

Les résultantes des forces appliquées aux molécules à la surface de la goutte sont dirigées vers l'intérieur du liquide. Il faut donc fournir un certain travail pour amener les molécules du centre du liquide vers la surface et ainsi augmenter son aire. Comme précédemment, on définit la tension superficielle (de l'eau) comme la quantité de travail δW à fournir à une goutte d'eau pour augmenter son aire d'une unité infinitésimale dA , bien qu'ici cette aire ne soit pas plane. On a l'égalité suivante:

$$\delta W = dE_p \text{ et } E_p = \int \delta W = \int \gamma \cdot dA = \gamma \cdot A$$

Autrement dit, l'énergie potentielle d'une surface est proportionnelle à son aire. La goutte va tendre à minimiser son énergie potentielle, et par conséquent adoptera en l'absence de contraintes extérieures la forme pour laquelle sa surface sera, à volume identique, minimale : la sphère.

II) Mouillage et Hydrophobie

1) Le mouillage des gouttes

- Lorsqu'on pose une goutte sur une surface, celle-ci va plus ou moins s'étaler, on dit qu'elle va plus ou moins bien mouiller cette surface.
- La surface sur laquelle est posée la goutte est appelée le *substrat* et on fait en général la distinction entre deux grands types de mouillage que l'on appelle soit *mouillage partiel*, soit *mouillage total*. Nous expliquerons ultérieurement ce que définissent ces deux termes.
- Le mouillage dépend de plusieurs facteurs que nous allons détailler et est principalement lié à la tension superficielle que nous avons préalablement définie.

Il est tout d'abord intéressant de noter que le mouillage est une grandeur difficilement quantifiable. Il existe pourtant une grandeur qui différencie les régimes de mouillage et que l'on appelle le *paramètre d'étalement*, que l'on note S .

S mesure en fait la différence entre l'énergie de surface du substrat lorsqu'il est sec et celle lorsqu'il est mouillé.

Cette grandeur est définie par la formule :

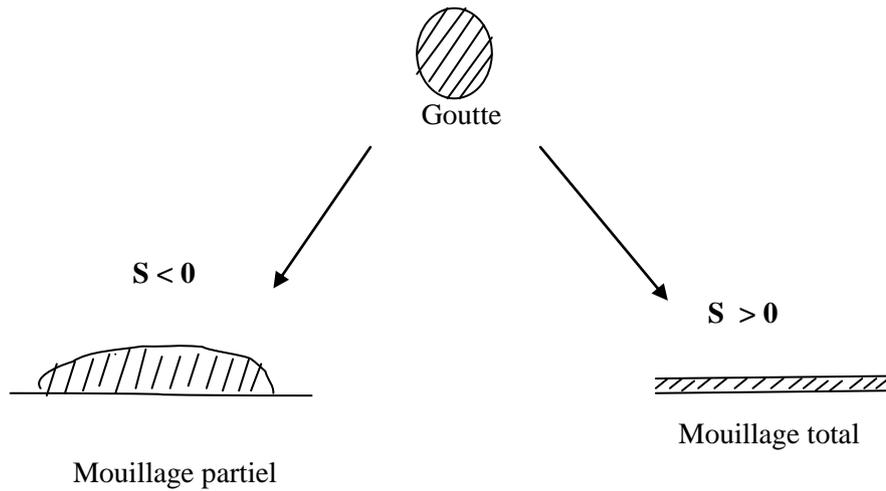
$$S = \gamma_{SO} - (\gamma_{SL} + \gamma)$$

Où γ_{SO} désigne la tension superficielle solide/air, γ_{SL} désigne la tension superficielle solide/liquide et γ la tension superficielle liquide/air.

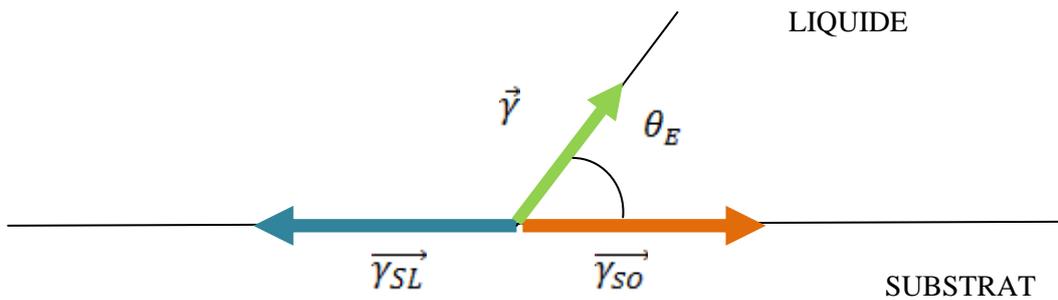
Si $S > 0$, on est dans ce qu'on appelle le mouillage total car l'énergie de surface du substrat lorsqu'il est mouillé est plus faible que son énergie de surface lorsqu'il est sec. La goutte va donc s'étaler complètement sur le substrat pour diminuer son énergie superficielle et ne plus former qu'un film d'épaisseur nanoscopique.

Si $S < 0$, on atteint le mouillage partiel, ce qui signifie que la goutte sera posée sur le substrat en formant une calotte sphérique.

Les deux types de régimes de mouillage sont résumés sur ce schéma :



Dans les deux types de régimes, on peut définir la forme de la goutte mouillant le substrat par son angle de contact noté θ_E avec le substrat. Cet angle est défini sur le schéma suivant :



La valeur de cet angle est déterminée par le fait qu'à la ligne de contact (ou encore « ligne triple »), les trois forces capillaires que nous avons dessinées doivent s'équilibrer. Si on projette ces trois forces sur l'axe horizontal, cette relation d'équilibre (ou relation de Young) est donnée par :

$$-\gamma \times \cos \theta_E = \gamma_{SO} - \gamma_{SL}$$

Soit encore :

$$S = \gamma(\cos \theta_E + 1)$$

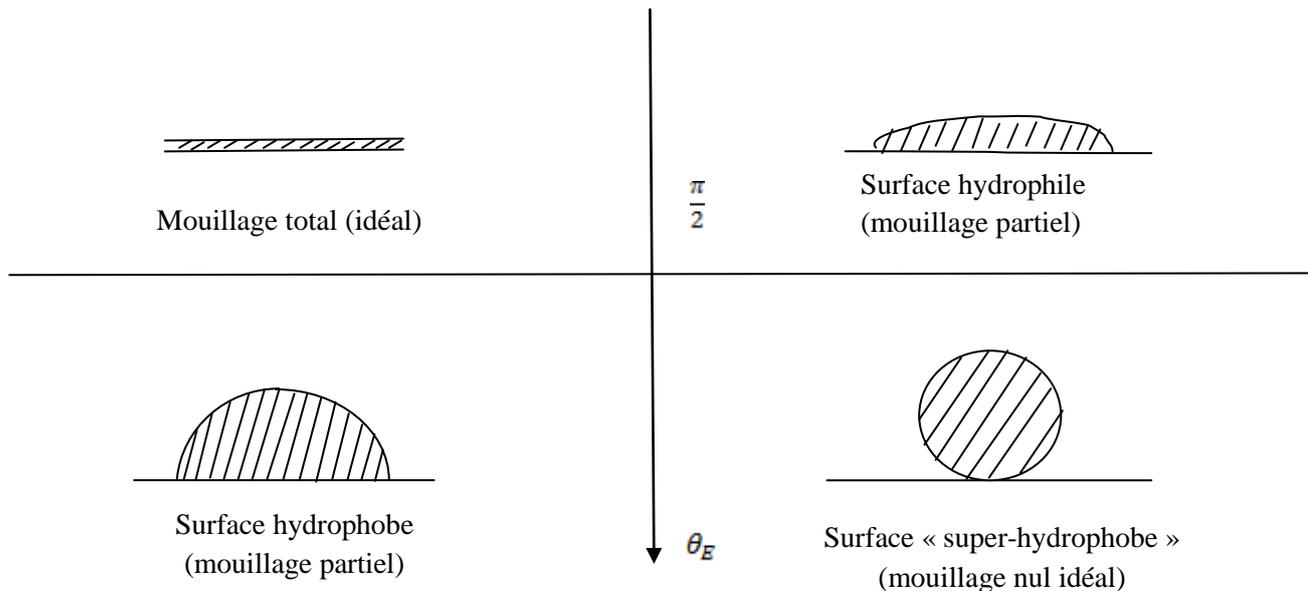
Lorsqu'on projette ces forces sur le plan vertical, l'équilibre vient du fait que le substrat possède une certaine élasticité qui vient compenser la composante verticale de $\vec{\gamma}$ par réaction.

Ainsi lorsque nous sommes en mouillage partiel sur un substrat que nous qualifierons pour l'instant de « plutôt mouillant », les valeurs de θ_E sont telles que $0 < \theta_E \leq \frac{\pi}{2}$. Si le substrat est « plutôt non mouillant » alors la goutte va avoir tendance à rester sphérique et $\theta_E > \frac{\pi}{2}$

Le paramètre d'étalement est en fait déterminé qualitativement par les interactions de Van der Waals qui se mettent en place à l'intérieur du substrat entre les molécules qui le composent (ce qui définit γ_{SO}) et au niveau de la ligne de contact entre la goutte et le substrat entre les molécules du liquide et celle du substrat (ce qui définit γ_{SL}).

2) Hydrophobie et Hydrophilie

Nous proposons ici un tableau récapitulatif des différents types de régimes de mouillage déjà étudiés en fonction de leur angle de contact et en y incluant deux nouvelles catégories que sont l'*hydrophilie* et l'*hydrophobie*.



Comme on peut le voir sur ce schéma, l'hydrophilie qualifie toutes les surfaces « très mouillantes » c'est-à-dire celles sur lesquelles l'angle de contact d'une goutte posée tend vers 0 ($\theta_E \rightarrow 0$).

Au contraire, l'hydrophobie qualifie les surfaces très peu mouillantes voire quasiment non mouillantes. Ces surfaces hydrophobes sont donc caractérisées par un angle de contact très élevé et qui dans le cas de ce que l'on a nommé la « super hydrophobie » peut même tendre vers la valeur limite de π ($\theta_E \rightarrow \pi$).

o Comment influencer sur le caractère hydrophile ou hydrophobe d'un matériau ?

À l'intérieur de sa structure moléculaire, un matériau peut ou non disposer de groupes caractéristiques qui peuvent être soit hydrophiles soit hydrophobes suivant les atomes qui les composent et leur organisation au sein du groupe. Un moyen simple et efficace de modifier le type de mouillage d'une surface consiste donc à lui ajouter des groupes hydrophiles par des traitements chimiques successifs si on veut lui donner un caractère hydrophile ou alors de lui ajouter des groupes hydrophobes (groupes fluorés par exemple) si on veut insister sur le caractère hydrophobe du matériau.

Une remarque importante vient ensuite du fait que la relation de Young définie précédemment ne s'applique en fait qu'à des surfaces solides que l'on suppose idéales, c'est-à-dire complètement lisses et chimiquement parfaitement homogènes. Dans la réalité, une surface peut être plus ou moins rugueuse ou

présenter localement des microfissures, ce qui peut modifier sa structure moléculaire par endroit. Nous allons voir que ces deux paramètres influent grandement sur le mouillage des gouttes sur un substrat.

L'influence de la rugosité sur le mouillage d'un substrat a été découverte par l'américain Wenzel en 1936. Celui-ci a alors proposé un modèle qui porte aujourd'hui son nom et qui permet de déterminer la valeur de l'angle de contact d'une goutte posée sur un substrat rugueux. Ce modèle est basé sur le principe que localement la relation de Young s'applique, mais qu'elle doit être nuancée par la présence d'un nouveau facteur qui est la rugosité du substrat que l'on notera r . La nouvelle valeur de l'angle de contact est alors donnée par la relation de Wenzel telle que :

$$\cos \theta^* = r \cos \theta_E$$

➤ Deux conséquences découlent alors de cette relation :

- Tout d'abord, si on prend en considération le cas d'un substrat rugueux ($r > 1$) et hydrophile ($\theta_E < \frac{\pi}{2}$), on observe que de par la relation de Wenzel $\theta^* < \theta_E$. De même, si le substrat est rugueux et hydrophobe ($\theta_E > \frac{\pi}{2}$), alors $\theta^* > \theta_E$. La rugosité du matériau augmente donc son caractère hydrophile ou hydrophobe initial.

- Une seconde remarque intéressante et que comme nous travaillons ici avec des angles de contact tels que $0 < \theta_E < \pi$, et que la rugosité n'étant par définition pas bornée, il existe une certaine valeur r^* à partir de laquelle on obtient un mouillage total ($\theta^* = \pi$) ou un mouillage nul ($\theta^* = 0$). Cette valeur r^* est de plus facilement identifiable car toujours grâce à la relation de Wenzel, on a : $r^* = \frac{1}{|\cos \theta_E|}$

III) Le rebond des gouttes

Aussi étonnant que cela puisse paraître, les gouttes d'eau peuvent rebondir élastiquement sur des surfaces. Dans la vie de tous les jours pourtant, l'expérience nous invite plutôt à penser qu'une goutte qui tombe sur une surface plane aura tendance à s'écraser au moment du choc. En réalité, ces phénomènes de rebond de gouttes n'apparaissent que dans des conditions bien précises et nécessitent principalement l'utilisation d'une surface « super-hydrophobe » pour être mis en évidence, ce qui il est vrai est difficile à trouver dans la vie quotidienne. De plus, le caractère centimétrique et ultra-rapide de ces rebonds de gouttes les rend très difficiles à observer à l'œil nu. Ils n'en sont pourtant pas moins très surprenants et très spectaculaires !

1) Comment une goutte d'eau peut-elle rebondir sur une surface super-hydrophobe ?

L'eau peut rebondir sur des surfaces super-hydrophobes, alors qu'elle n'entre en réalité en contact qu'avec une infime partie de ces surfaces : la goutte semble sur coussin d'air. Aussi, on remarque par l'expérience que l'inclinaison de la surface d'un angle inférieur à 1° suffit à mettre la goutte en mouvement (voir expérience 1)

Par conséquent, il faut chercher un autre moyen qui permette à la goutte d'atteindre une vitesse nulle, c'est à dire de perdre ou d'emmagasiner toute son énergie cinétique, lors de son arrivée sur une surface super-hydrophobe. On remarque sur les vidéos une déformation notable de l'apparence de la goutte lors du choc sur le substrat : elle n'est plus une sphère, solide à la surface minimale, mais a pris une autre forme, de surface forcément plus importante. On peut en déduire que l'énergie cinétique de la goutte est stockée sous forme d'énergie potentielle de surface lors de son arrivée sur une surface super-hydrophobe et que cette énergie peut ensuite être restituée sous forme d'énergie cinétique, ce qui est à l'origine du rebond de la goutte.

2) Propriétés des rebonds de gouttes

○ L'élasticité :

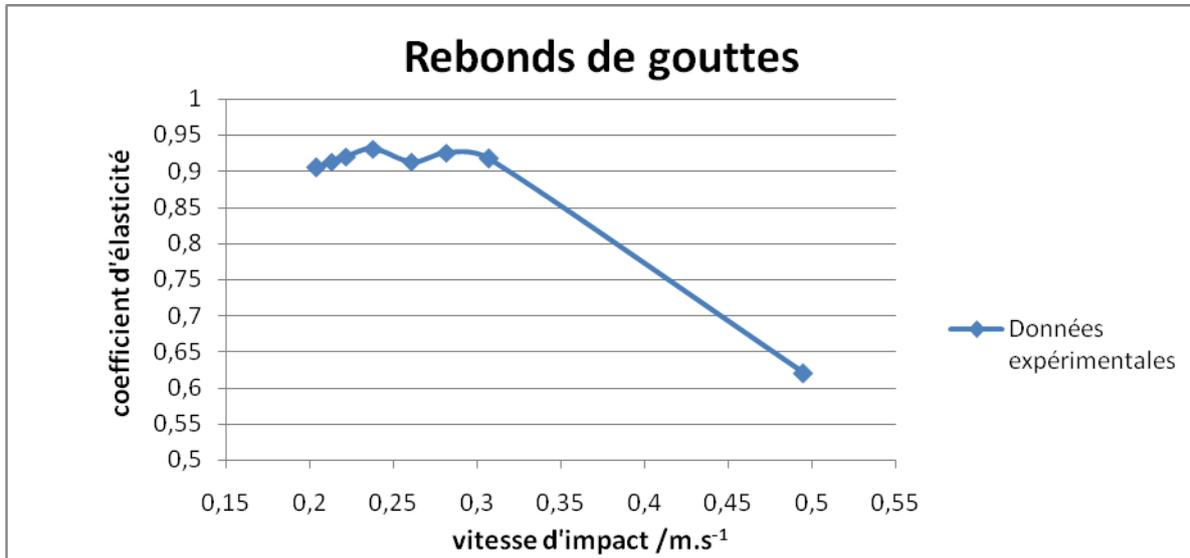
- lorsque que l'on procède à des expériences de rebond de matériau sur une surface solide, on observe de grandes disparités entre les observations obtenues.
- Nous avons ainsi procédé à de nombreux lâchers de balles de différents matériaux (voir expérience 2) et nous avons pu observer, lorsque nous nous sommes intéressés à la décroissance des hauteurs des rebonds au cours du temps, que les différences étaient grandes entre les matériaux. Il est ainsi intuitif qu'une balle de tennis va rebondir plus haut et plus longtemps qu'une balle en mousse.
- Il faut donc définir une grandeur propre à chaque matériau et qui caractérise son aptitude à rebondir sur une surface solide. C'est le coefficient d'élasticité, noté e donné par la relation :

$$e = \left| \frac{v'}{v} \right| \text{ avec } \begin{cases} v' : \text{vitesse du matériau après le rebond (en m.s}^{-1}\text{)} \\ v : \text{vitesse du matériau avant le rebond (en m.s}^{-1}\text{)} \\ e : \text{coefficient d'élasticité (sans dimension)} \end{cases}$$

- Il est clair que $0 \leq e \leq 1$ et que plus e est élevé et plus le choc est élastique (moins il y a de pertes d'énergie cinétique à chaque rebond).
- Une étude par pointage nous montre que, pour tous les matériaux e est constant à chaque rebond et à titre d'exemple, on a : $e_{\text{balle de tennis}} = 0,88$ ou $e_{\text{bille de fer}} = 0,32$

-> Quel est donc le coefficient d'élasticité de l'eau lors d'un rebond sur une surface hydrophobe ?

- Nous avons tout comme pour les balles de différents matériaux procédé à différents pointages de rebonds de gouttes (expérience 3) et consigné les résultats assez étonnants dans ce graphique :



- On remarque donc que le coefficient d'élasticité de l'eau varie avec la vitesse d'impact de la goutte mais que lorsque cette vitesse est assez faible, e_{eau} est constant et très élevé (plus de 0,9). On observe d'ailleurs que ce coefficient d'élasticité à faible vitesse d'impact est supérieur à celui d'une balle de tennis !

→ Les rebonds de gouttes semblent donc être des chocs très élastiques et qui n'entraînent quasi pas de pertes d'énergie à chaque rebond. On peut alors proposer une analogie entre le rebond d'une goutte et l'oscillation non amortie d'un ressort, qui elle aussi se fait avec très peu de dissipation d'énergie.

3) L'analogie Goutte-Ressort

- Loi de Hooke et élasticité :

On remarque tout d'abord que la tension superficielle γ a les dimensions de la raideur d'un ressort (des N/m).

En effet, selon la loi de Hooke, la force restituée lors de la déformation d'un ressort est proportionnelle à cette déformation, soit

$$F_x = m.a_x = - k x \text{ avec } \begin{cases} x : \text{allongement du ressort (en m)} \\ k : \text{constante de raideur du ressort (en N/m)} \end{cases}$$

Le signe – apparaît puisque la force est dirigée selon la même direction mais avec un sens opposé à l'allongement. Ainsi, γ et k ont la même dimension.

De plus, par intégration du travail élémentaire $\delta W = F_x \cdot dx$, et en considérant que $\Delta E_p = -W$, on peut exprimer l'énergie potentielle élastique lors de l'étirement d'un ressort : $E_p = -W = \int k \cdot x \cdot dx = \frac{1}{2} k \cdot x^2$

Comme la tension superficielle peut être rapprochée de la raideur d'un ressort, on cherche à établir une analogie entre le rebond d'une goutte et la déformation d'un ressort.

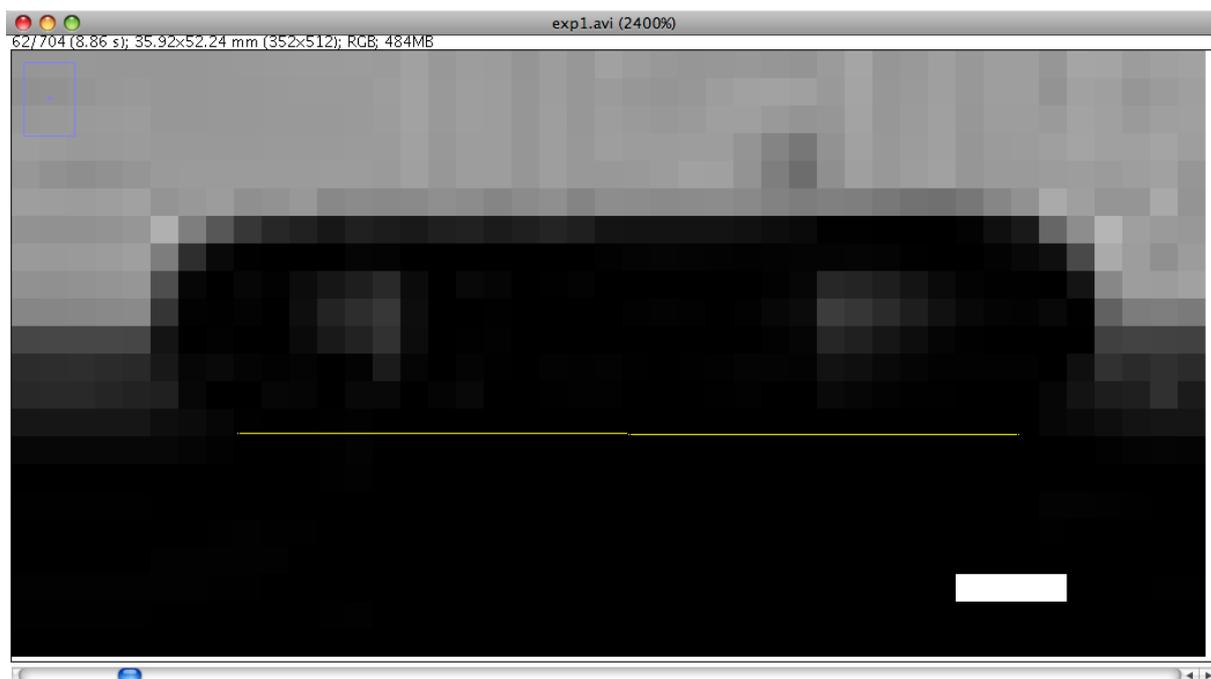
Nous avons déjà vu que la goutte a la possibilité de stocker son énergie cinétique sous forme d'énergie potentielle de surface.

On veut donc chercher à prouver par l'expérience que l'on trouve une loi telle que :

$$E_k = E_p \Leftrightarrow \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \gamma \cdot \delta^2 \Leftrightarrow v \propto \delta \quad \text{avec} \quad \begin{cases} m : \text{masse de la goutte (en kg)} \\ v : \text{vitesse de la goutte (en m.s}^{-1}\text{)} \\ \delta : \text{une déformation de la goutte (en m)} \end{cases}$$

Ainsi, pour valider l'analogie proposée entre goutte et ressort, il faut chercher une relation entre la vitesse de la goutte avant le choc sur la surface super-hydrophobe, et sa déformation lorsqu'elle atteint une vitesse nulle.

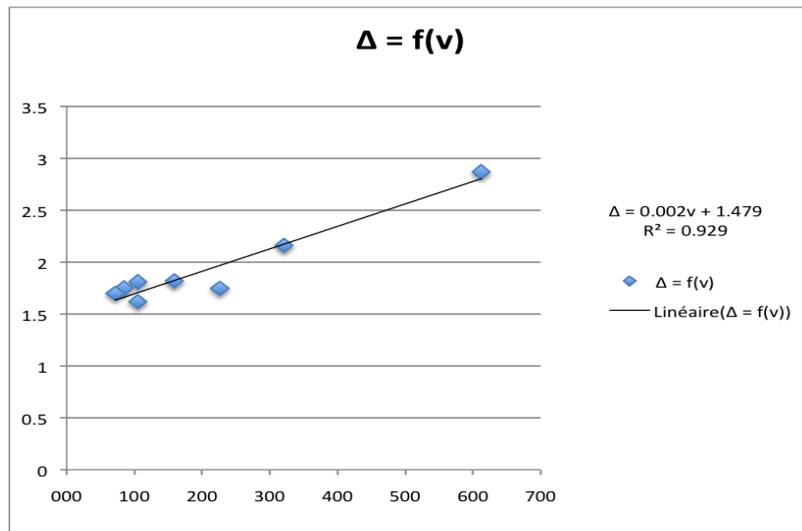
Considérons la déformation notée Δ lors de l'impact d'une goutte sur notre surface, représentée par le trait jaune dans le document ci-dessous :



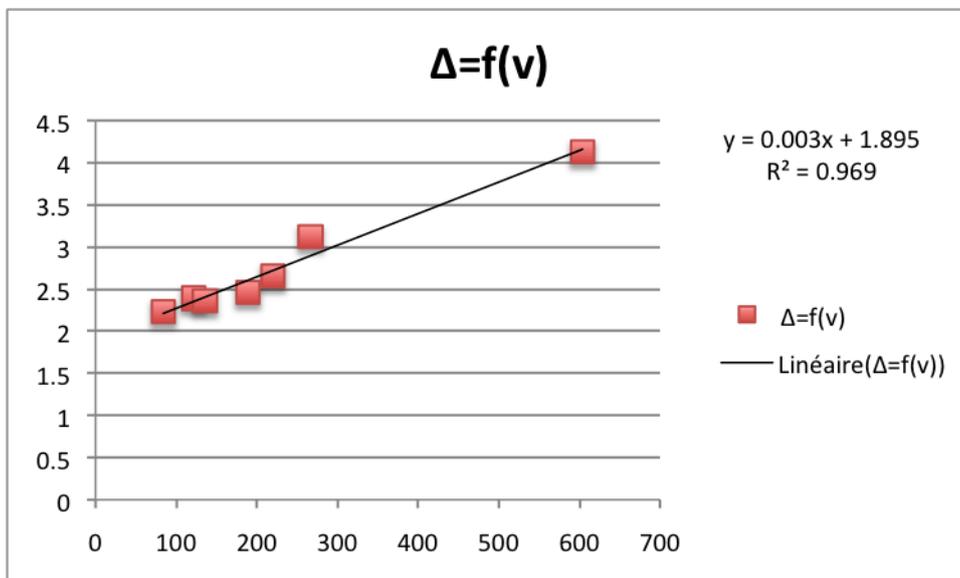
(Le trait blanc correspond à une distance de 0,5 mm)

On peut penser que Δ , mesuré en mm, peut correspondre à la déformation cherchée, puisqu'une goutte sans vitesse initiale, c'est à dire simplement posée sur la surface, apparaît comme sphérique, et non pas aplatie.

Nous avons mesuré sur plusieurs vidéos et avec des tailles de gouttes variables la déformation Δ . Δ est mesuré en mm et la vitesse des gouttes lors du rebond est exprimée en mm/s.



Graphe obtenu pour une goutte de volume 5,58 mm³

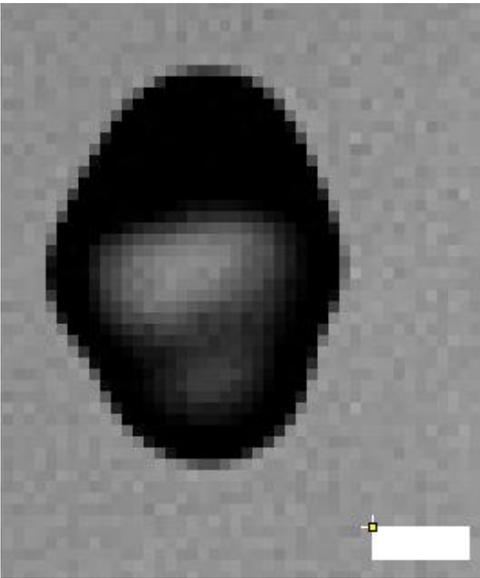


Graphe obtenu pour une goutte de volume 11,2 mm³

On remarque tout d'abord la dispersion des valeurs : comme le premier choc n'est pas du tout élastique, la vitesse chute rapidement au premier rebond alors qu'elle ne diminue que très lentement par la suite.

On obtient ensuite une relation affine entre Δ et v , validée par des coefficients de corrélation relativement élevés. Cependant, si l'on prend en compte le fait que pour une goutte simplement posée sur notre surface, on mesure quand même une déformation (la résolution est relativement basse, et on voit ainsi des pixels noirs lorsque la goutte est indiscernablement proche de la surface), et que l'on soustrait cette déformation « initiale » à celles mesurées, on obtient alors une relation de proportionnalité entre v et Δ .

Ainsi, l'expérience nous permet de montrer que v et Δ sont proportionnelles et que l'on peut comparer la surface de la goutte à un ressort dans la mesure où elle permet de stocker de l'énergie cinétique sous forme d'énergie potentielle de surface.



Cependant, les rebonds de goutte ne sont pas totalement élastiques pour autant. En effet, lors de nos mesures on a bien remarqué que le premier choc engendrait une perte de vitesse particulièrement importante.

L'image ci-contre (le trait blanc correspond à une distance de 1 mm), montre qu'une goutte après un rebond n'est plus sphérique. Ainsi, toute l'énergie potentielle élastique emmagasinée lors du choc avec la surface super-hydrophobe n'est pas entièrement restituée, puisque la surface de la goutte n'est pas minimale (ce n'est plus une sphère).

A quoi sont dues les pertes d'énergie ? On peut supposer que ces pertes se font sous la forme d'échanges d'énergie thermique ou de frottements de la goutte avec l'air.

Conclusion

L'eau est caractérisée par sa forte tension superficielle, ce qui lui confère une multitude de propriétés physiques. Ainsi, lorsque placée sur une surface super-hydrophobe, une goutte d'eau se comporte exactement comme si elle se trouvait dans l'air, et adopte une forme sphérique. Nous avons montré qu'une goutte pouvait rebondir sur un tel substrat en déformant sa surface, c'est-à-dire en stockant toute son énergie cinétique sous forme d'énergie potentielle élastique, énergie pouvant ensuite être restituée pour faire rebondir la goutte. La déformation de surface de la goutte est le seul moteur du rebond : la goutte n'interagit pas avec le substrat fluoré. Cette particularité physique des surfaces super-hydrophobes a de nombreuses applications dans l'industrie comme dans la vie courante. Ainsi, le traitement de matériaux pour les rendre hydrophobes permet par exemple de créer des vitres ou des lunettes auto-nettoyantes, des poêles qui n'accrochent pas ou encore des enduits pour améliorer les performances des bateaux de course.

A titre plus personnel, l'expérience des Olympiades nous aura été extrêmement bénéfique et nous a permis de rencontrer et de découvrir le monde de la Recherche. Nous souhaitons tout particulièrement remercier M. David Quéré et tous ses étudiants en thèse pour l'aide et le soutien qu'ils nous ont apportés, ainsi que l'ESPCI pour nous avoir reçus.

IV Annexes

Protocoles et résultats expérimentaux

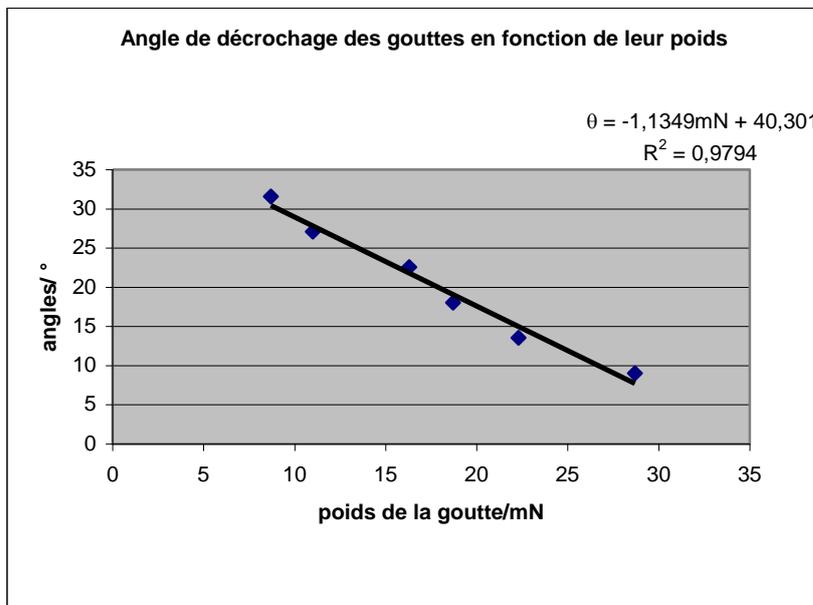
Expérience 1 : Angle de décrochage d'une goutte posée sur une surface hydrophobe

Nous avons ici voulu observer qualitativement si le volume d'une goutte posée sur une surface hydrophobe (ici une poêle modérément hydrophobe en Téflon©) influait sur son angle de décrochage. On définit dans notre expérience l'angle de décrochage par la valeur minimale de l'angle pour lequel la goutte se met spontanément en mouvement.



Pour cela on fixe une des extrémités de la poêle sur une surface plane et on fixe le manche sur un support-élévateur. En calibrant la hauteur moyenne d'un tour de l'élévateur et en appliquant les formules trigonométriques simples, il est alors aisé de retrouver les variations d'angles lors de l'expérience.

On procède alors à une série d'expériences en modifiant le volume des gouttes utilisées (volumes mesurés à l'aide d'une burette) et nous avons consigné les résultats dans le graphique suivant.

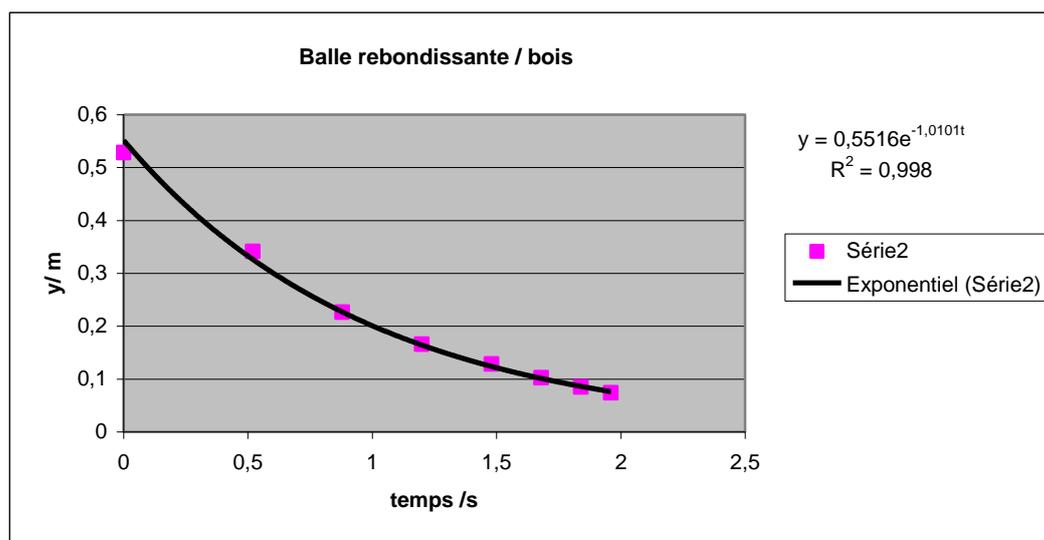


On remarque donc que l'angle de décrochage varie linéairement avec le volume de la goutte (et donc avec son poids). On peut également dire que plus la goutte est grosse et plus elle va se « décrocher » pour un angle d'inclinaison faible.

Expérience 2 : Etude de rebonds plus ou moins élastiques

On réalise des vidéos de rebonds de différentes balles sur une plaque en bois, toujours à partir d'une hauteur h fixe de 40 cm.

On analyse ensuite ces vidéos à l'aide d'un logiciel de traitement d'image en réalisant un pointage des balles au sommet de chacun de leurs rebonds. Grâce à un tableur, on réalise ensuite des graphiques représentant la décroissance de la hauteur des rebonds en fonction du temps. Ici un exemple de nos résultats pour une balle de tennis :



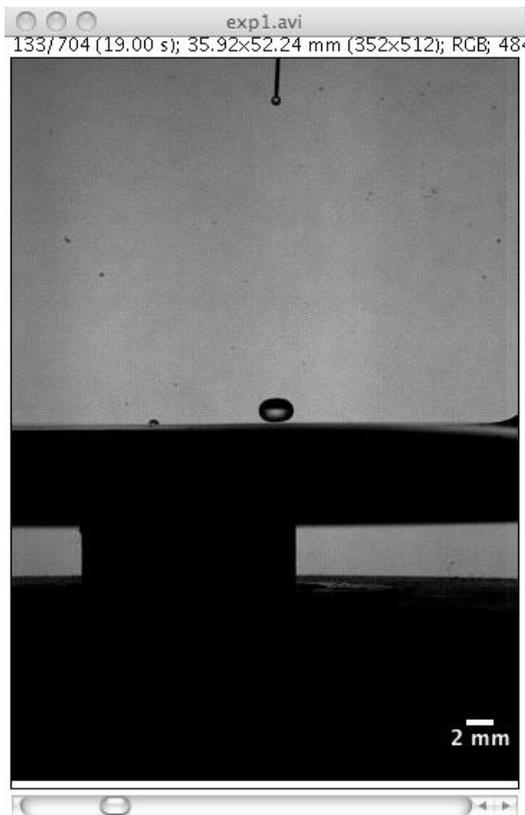
On observe donc que la décroissance de la hauteur de rebond semble obéir à une loi exponentielle. De plus les différences de résultats obtenues tendent à montrer que cette décroissance dépend des caractéristiques propres à chaque balle. On peut alors supposer qu'un paramètre important d'un rebond en général est l'élasticité du matériau qui rebondit.

Expérience 3 : Protocole expérimental des rebonds de gouttes

Le rebond d'une goutte est un phénomène de l'ordre du centième de seconde.

Pour étudier ces phénomènes, nous avons eu la chance de pouvoir effectuer nos différentes expériences au sein de l'Ecole Supérieure de Physique-Chimie de Paris, où nous avons pu disposer de caméras à prise d'images extrêmement rapide (plus de 10000 images par seconde).

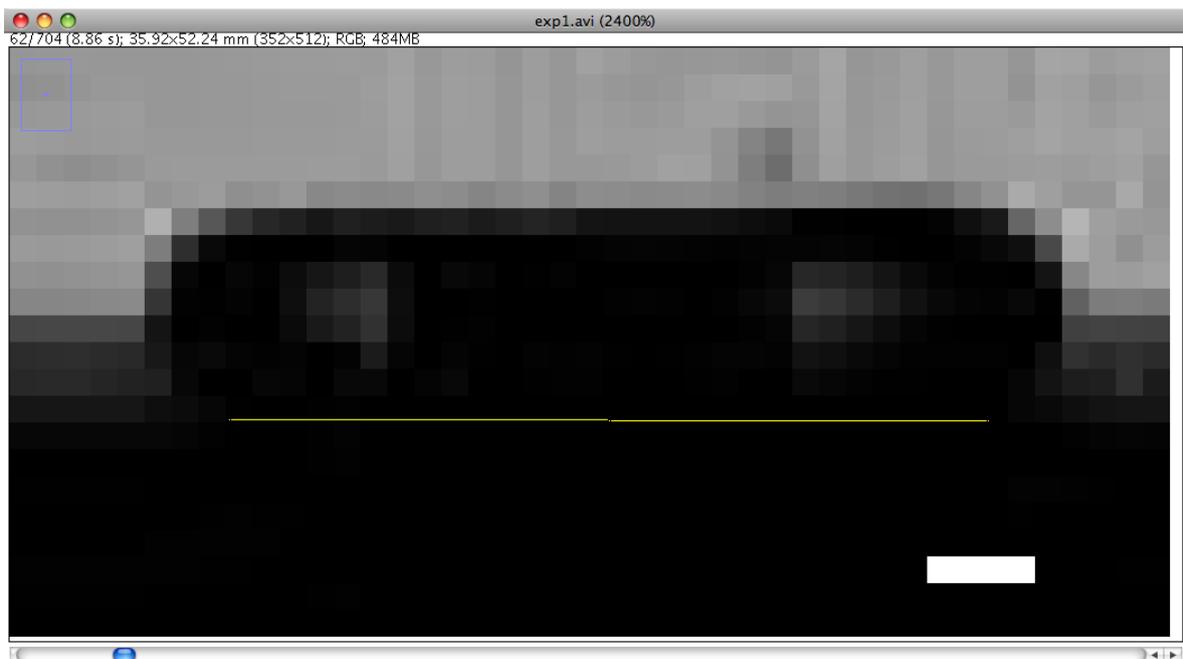
Après avoir réalisé un étalonnage à l'aide de papier millimétré, nous avons réalisé plusieurs séquences de rebonds de gouttes en faisant varier le volume de chaque goutte.



On obtient alors une série d'images comparables à celle-ci. En les associant grâce au logiciel de traitement d'image ImageJ, nous avons pu obtenir des films exploitables.

Afin d'exploiter les vidéos de rebonds de goutte obtenues grâce à la caméra haute vitesse, nous avons utilisé un logiciel gratuit : IMAGE J. Voici le protocole que nous avons suivi pour mesurer notamment la vitesse des gouttes juste avant leur impact sur la surface super-hydrophobe.

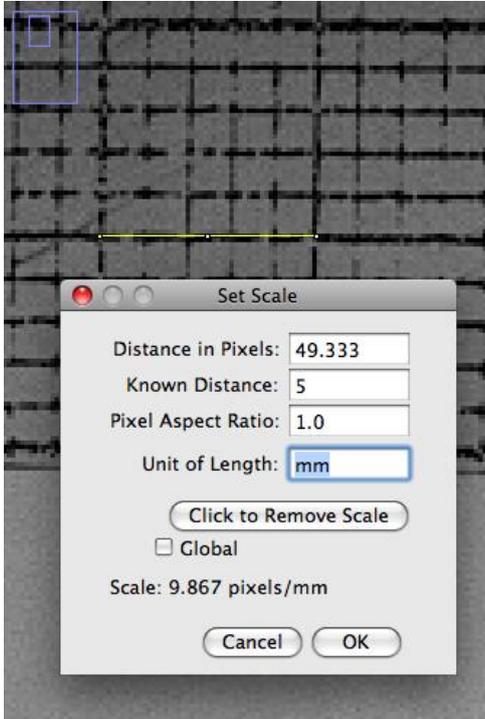
Mesure de la déformation de la goutte à l'impact



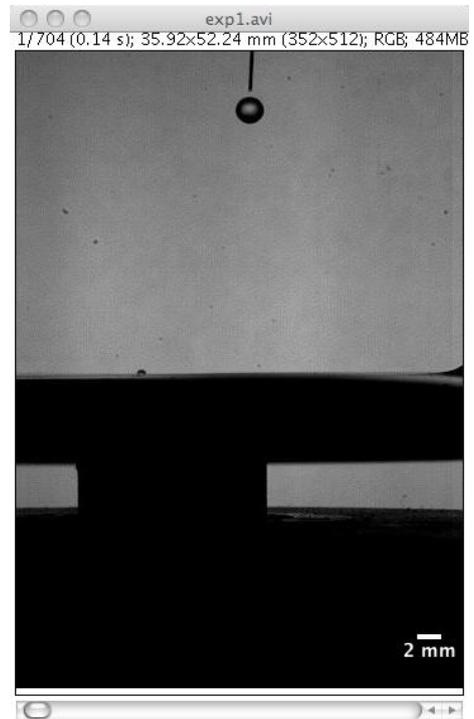
Le logiciel nous permet de déterminer la longueur de la déformation choisie, la vidéo étant étalonnée au préalable (trait blanc = 0.5 mm).

Étalonnage

Sur toutes les vidéos que nous avons exploitées, il a d'abord fallu établir une échelle :



Étalonnage de la vidéo



Vidéo étalonnée

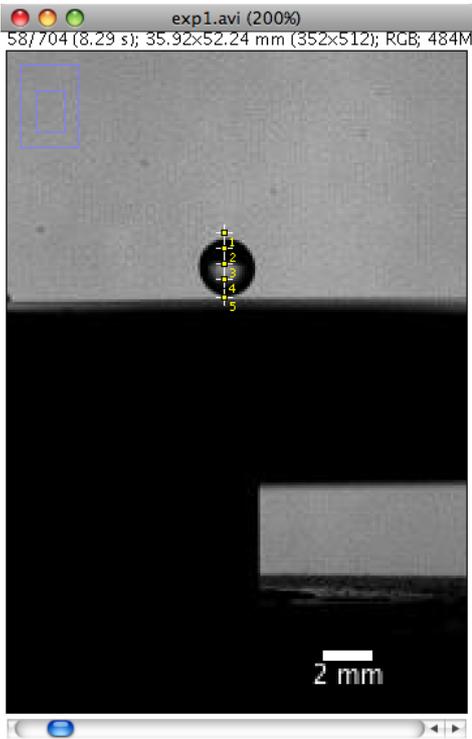
En effectuant une première prise de vue d'un transparent millimétré, le logiciel nous permet d'étalonner.

Pointage

Pour mesurer les vitesses des gouttes, nous avons eu recours à deux méthodes : un pointage direct d'un point de la goutte lorsqu'elle est sphérique, et le pointage du centre de gravité de la goutte lorsqu'elle est déformée.

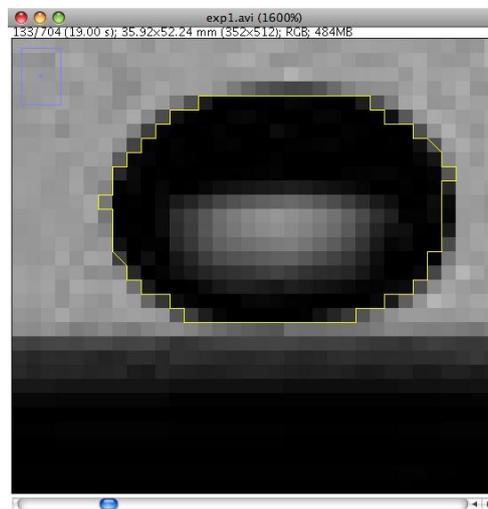
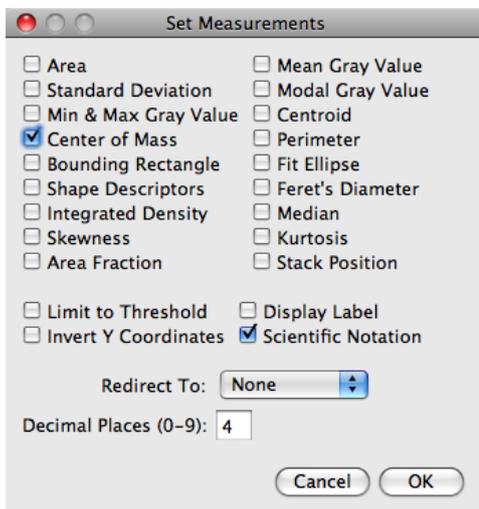
Le pointage direct permet d'obtenir un tableau des positions (x ; y) ce qui permet ensuite en exploitant les valeurs (Yi) sur Excel, de calculer la vitesse verticale de la goutte.

Lorsque la goutte est déformée, on peut sélectionner le contour de la goutte et le logiciel détermine les coordonnées (XM ; YM) de son centre de gravité (« Center of mass »).



	Mean	X	Y
1	1.6100E2	1.8980E1	2.3980E1
2	1.0000E0	1.8980E1	2.4592E1
3	8.3000E1	1.8980E1	2.5204E1
4	6.9000E1	1.8980E1	2.5816E1
5	1.3100E2	1.8980E1	2.6531E1

Captures d'écran : pointage de cinq positions et coordonnées obtenues.

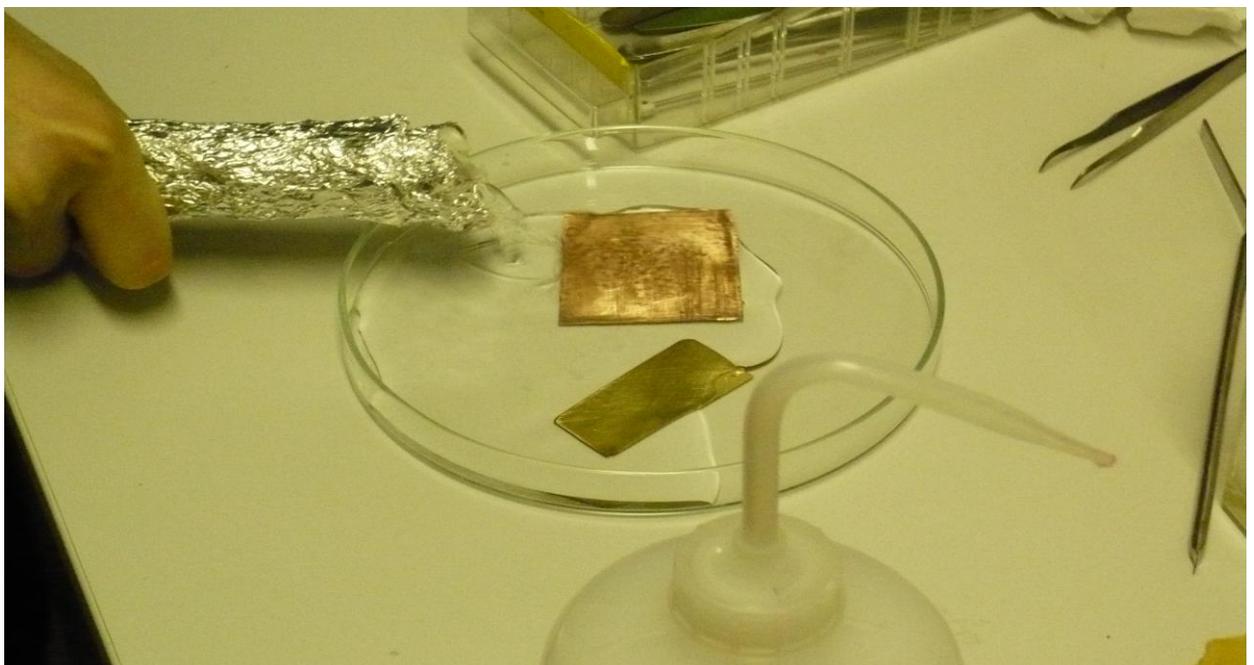


	XM	YM
1	1.8742E1	2.5867E1

Captures d'écran : On surligne le contour de la goutte, on demande au logiciel de déterminer le centre de gravité et une fenêtre s'affiche avec le résultat (XM ; YM).

Fabrication d'une surface super-hydrophobe

- Dans le cadre de notre étude, nous avons été amenés à fabriquer nous aussi des plaques super-hydrophobes afin d'effectuer nos expériences. Pour cela nous avons suivi un protocole précis que nous vous proposons avec des explications sur le déroulement des étapes de fabrication.
- Dans l'optique de créer un matériau super-hydrophobe, plusieurs étapes sont indispensables. Celles ci sont de nature à la fois physique et chimique. Le traitement physique consiste à ajouter différentes échelles de rugosité sur le substrat ce qui permet d'exacerber, en augmentant la surface de contact entre l'eau et le matériau, la tendance hydrophile ou hydrophobe initiale du substrat. La partie chimique du traitement consiste, quant à elle en l'ajout d'une couche de molécules fortement polarisées et possédant une chaîne perfluorée, qui repousse les molécules d'eau et confère son caractère hydrophobe à notre substrat.
- Pour fabriquer une plaque de matériau super-hydrophobe, on utilise ici du zinc, du cuivre ou de l'étain pour la simple raison que ces espèces chimiques réagissent facilement avec le nitrate d'argent, réaction d'oxydo-réduction qui est le facteur responsable de la rugosité recherchée par dépôt de nano-particules d'argent sur le substrat (avec le cuivre, on préférera cependant lorsque cela est possible utiliser un sel contenant de l'or car la rugosité du matériau obtenu s'en voit encore accrue ainsi que sa résistance).
- En tout premier lieu, l'opération débutant par une oxydation, on travaille à éliminer les agents anti-oxydants présents sur la quasi-totalité des métaux qu'il est possible d'obtenir dans le commerce. Pour cela une simple friction de la plaque à l'aide d'un morceau de papier de verre suffit. Une fois cette opération effectuée, on rince la plaque obtenue avec de l'éthanol, en la saisissant délicatement avec une pince elle aussi rincée afin d'éviter l'accumulation de toute poussière qui pourrait gêner le reste manipulation.
- Lorsque la plaque est « propre », on la trempe dans un bain de nitrate d'argent. La réaction quasi immédiate va avoir pour conséquence la création d'une nouvelle échelle de rugosité qui est de l'ordre du micron. Celle ci est due à la répartition aléatoire des « monticules » d'argents. Il est cependant possible de créer une rugosité beaucoup plus contrôlée sous forme de petits cylindres plus résistants gravés au laser dans le substrat, mais la difficulté de fabrication d'une telle échelle de rugosité et la faible différence d'efficacité (en terme d'hydrophobie) observée, nous ont fait préférer ce procédé de fabrication plus « artisanal », qui peut être mis en place à l'échelle d'un laboratoire scolaire. Après quelques instants dans le bain de nitrate d'argent, on sort la plaque, on



la rince à l'eau et on la sèche dans une étuve ou bien à l'air libre du laboratoire, à condition que la pureté de l'air de l'endroit permette un séchage ne s'accompagnant pas d'une accumulation de poussière sur le matériau. Il est intéressant de noter qu'après cette étape de fabrication, la plaque de cuivre par exemple est très hydrophile et que l'eau mouille quasi totalement à sa surface.

- Ensuite intervient l'étape chimique, qui est apportée grâce à un bain de HDFT (produit qu'il n'est malheureusement pas aisé de se procurer), qui est un composant organique de synthèse comportant beaucoup de groupes fluorés. La plaque de métal est alors plongée dans ce bain pendant une durée d'environ dix minutes. Lorsque celle-ci est finalement sortie, elle est rincée puis subit de nouveau un séchage et est enfin « prête à l'emploi ».
- La plaque ainsi obtenue a une durée de vie assez conséquente en temps mais résiste cependant assez mal aux différentes manipulations et autres chocs avec les gouttes d'eau. Il est donc impératif de changer la plaque tous les mois si son utilisation est assez fréquente. Heureusement, le temps de fabrication est limité et la simplicité du processus de fabrication permet de produire un nombre conséquent de surfaces hydrophobes à chaque fois.