

## **Annexes**

- Annexe 1.** La tension de surface
- Annexe 2.** Analyse dimensionnelle de la tension de surface
- Annexe 3.** La loi de Laplace
- Annexe 4.** Nos mesures pour les solutions de SDS
- Annexe 5.** Galères sur Géogébra
- Annexe 6.** Le principe de la construction de l'algorithme de Thomson
- Annexe 7.** Quelques précisions sur notre compteur de gouttes
- Annexe 8.** La difficile recherche de reproductibilité de nos photographies

## Annexe 1

### La tension superficielle

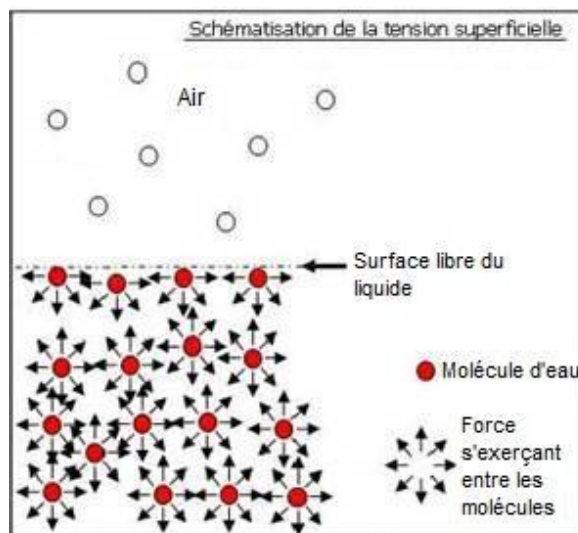
#### Qu'est-ce que la tension superficielle?

La tension superficielle, aussi appelée énergie de surface est liée aux interactions à l'interface entre deux milieux différents liquide/liquide ou liquide/gaz par exemple.

#### Quelle est l'origine de cette tension ?

Au sein d'un liquide au repos, chaque molécule est soumise à l'attraction de ses voisines proches. Les molécules d'un fluide exercent donc des forces les unes sur les autres. Ce sont ces forces d'attraction qui permettent de former un seul et même liquide. La valeur de ces forces exercées sur une molécule au sein de celui-ci, dirigées dans toutes les directions, est en moyenne nulle.

Cependant, les molécules présentes à la surface du liquide sont en contact avec les molécules d'un milieu différent. La répartition des forces pour les molécules situées à l'interface change : elles sont globalement dirigées vers le bas, puisque les molécules se trouvant dans le liquide attirent vers l'intérieur les molécules de surface. Les molécules de surface s'attirent également fortement entre-elles. Il y a donc une force qui s'exerce sur les surfaces de liquide, d'où le terme de tension superficielle. Ces molécules de surface constituent finalement une mince pellicule élastique.



*Schéma d'après site internet, mais modifié.*

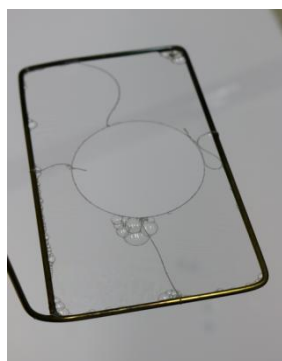
Un liquide, sous l'effet de la tension superficielle, tend spontanément à diminuer sa surface ce qui dans certains cas permet la formation d'une goutte (la sphère étant la forme de surface la plus petite possible pour un volume donné).

#### Comment mettre en évidence la tension superficielle ?

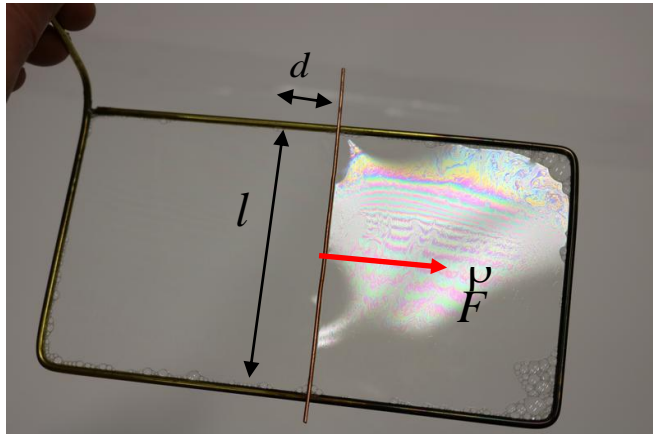
Dans les ouvrages ou sur internet, la notion de tension superficielle est souvent introduite par quelques expériences qui permettent de montrer clairement l'existence de cette force.

Nous avons reproduit ces expériences.

La première manipulation consiste à utiliser un cadre métallique, auquel on va accrocher une boucle de fil non tendu. On le plonge alors dans une solution d'eau savonneuse : le fil n'est toujours pas tendu (photo de gauche ci contre), mais sur l'ensemble du cadre se forme un film d'eau savonneuse. Puis, on crève le film à l'intérieur de la boucle. Le fil se tend alors en formant un cercle parfait (photo de droite). En effet les parties savonneuses restantes tirent sur le fil afin qu'elles diminuent au maximum leurs surfaces. Ces forces sont évidemment liées à la tension superficielle.



La deuxième expérience consiste à plonger ce même cadre dans la solution d'eau savonneuse afin d'obtenir un film. On pose alors un petit barreau sur le cadre. Tant que chaque partie du cadre porte un film d'eau savonneuse, il reste immobile sur le cadre. Mais dès que l'on crève une partie du film, l'équilibre est rompu et le barreau roule du côté opposé. Le film intact tire la tige. Ici encore, le liquide cherche à diminuer sa surface au maximum.



C'est donc bien la tension superficielle du liquide qui entraîne le barreau. On exprime la tension superficielle en  $\text{N.m}^{-1}$  ou en  $\text{J.m}^{-2}$ . Dans cette situation, on peut donner du sens à la grandeur « tension superficielle ». Sa valeur peut s'exprimer en  $\text{N.m}^{-1}$ . Si par exemple la longueur de la tige est de 10cm, alors le film tire sur le barreau avec une force égale à :

$$F = 2 \gamma \times l = 2 \times 25 \times 10^{-3} \times 10 \cdot 10^{-2} = \underline{5 \cdot 10^{-3} \text{ N}}$$
 C'est cette force qui met en mouvement le barreau.

On peut également exprimer la tension superficielle en  $\text{J.m}^{-2}$ , comme nous l'avons prouvé dans l'analyse dimensionnelle de l'annexe 2. Si par exemple on souhaite étirer le film restant en prenant la tige et en la tirant sur une distance  $d$ , on augmentera la surface de  $2S=2 \times l \times d$  où  $d$  est le déplacement de la tige et  $l$  sa longueur. L'énergie qu'il faudra fournir pour augmenter cette surface est  $2 \times S \times \gamma$

Par exemple si  $d=3\text{cm}$  alors  $2 \times S = 2 \times 10\text{cm} \times 3\text{cm} = 60 \text{ cm}^2$  soit  $60 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$  et l'énergie nécessaire sera  $E = 2 \times \gamma \times S = 25 \times 10^{-3} \times 60 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = \underline{1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Joule}}$ .

Cette expérience nous permet de bien comprendre ce que représente la grandeur  $\gamma$ . Voici quelques valeurs de  $\gamma$  que l'on retrouve facilement dans la littérature :

	eau (20°) - air	eau savonneuse - air	huile d'olive (20°) - air	mercure (18°) - air
$\gamma$ en $\text{N.m}^{-1}$ .	$73 \times 10^{-3}$	$\approx 25 \times 10^{-3}$	$\approx 32 \times 10^{-3}$	$500 \times 10^{-3}$

Nous avons également cherché à savoir pourquoi les effets étaient aussi spectaculaires avec de l'eau savonneuse. Le film qui se crée dans le cadre est très fin et contient peu de molécules d'eau. La tension de surface (pourtant plus faible que s'il s'agissait d'eau pure) s'exerce sur un film fin et léger. Les forces de tensions superficielles ont donc plus d'effets.

## Annexe 2

### Analyse dimensionnelle de la tension de surface

**Notre question: Pourquoi la tension superficielle est une énergie par unité de surface ( $\text{J.m}^{-2}$ ) mais aussi une force par unité de longueur ( $\text{N.m}^{-1}$ )?**

Nous commençons cette année, en terminale S, à faire des analyses dimensionnelles. Nous avons eu ici l'occasion de nous exercer !

Soit  $\gamma$  la tension superficielle. Il s'agit de montrer que  $\dim \gamma = \frac{\dim F}{L} = \frac{\dim E}{L^2}$

Étudions dans un premier temps l'expression  $\dim \gamma = \frac{\dim F}{L}$

D'après la deuxième loi de Newton (que nous étudierons dans quelques semaines d'après notre professeur), la valeur d'une force  $F$  est égale au produit d'une masse  $m$  par une valeur d'accélération. L'accélération étant une longueur sur un temps au carré, on a

donc  $\dim F = M.L.T^{-2}$  d'où  $\frac{\dim F}{L} = \frac{M.L.T^{-2}}{L} = M.T^{-2}$

À présent, considérons l'expression  $\frac{\dim E}{L^2}$

Einstein énonce qu'une énergie est équivalente au produit d'une masse par le carré de la vitesse de la lumière dans le vide ( $c$ ). On a donc

$$E = m.c^2$$

Par conséquent,  $\dim E = M.\dim(\text{vitesse})^2 = M \times \left(\frac{L}{T}\right)^2 = M \times \frac{L^2}{T^2}$

D'où  $\frac{\dim E}{L^2} = \frac{M \times \frac{L^2}{T^2}}{L^2} = \frac{M}{T^2} = M.T^{-2}$

(On peut également se servir de l'expression de l'énergie cinétique d'un objet de masse  $m$  en mouvement, énergie qui dépend du produit de sa masse par sa vitesse au carré :  $E = \frac{1}{2}m.v^2$  )

On a donc bien  $\dim \gamma = \frac{\dim F}{L} = \frac{\dim E}{L^2}$

**Une tension superficielle peut aussi bien s'exprimer en  $\text{N.m}^{-1}$  qu'en  $\text{J.m}^{-2}$ .**

## Annexe 3

### La loi de Laplace

Lors de l'étude des profils des gouttes suspendues (paragraphe III) nous avons découvert la loi de Laplace, loi que nous avons dû bien maîtriser pour réaliser notre algorithme.

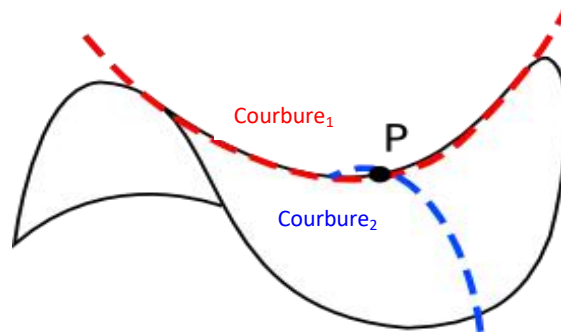
Lorsqu'une surface séparant deux milieux n'est pas plane, il existe une différence de pression lorsqu'on traverse la surface de séparation des deux fluides.

Cette différence de pression est liée à la tension de surface et dépend la courbure de la surface  $K = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

$$\Delta p = \gamma \times \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Pourquoi deux rayons de courbures différents ?

Visualisons une goutte pendante découpée selon deux plans normaux, l'intersection des deux plans définit deux courbes. Une première courbure pourrait être observée d'un point à l'intérieur de la goutte dans un plan horizontal, la courbure est concave. Tandis qu'une deuxième courbure pourrait être observée de ce même point dans un plan vertical, cette courbure-ci est concave puis convexe. Pour une comparaison plus concrète; cette observation revient à observer les deux courbures différentes que présente une selle de cheval, l'une formant un arc de cercle vers le ciel dans un plan horizontal, et l'autre un arc de cercle épousant le dos du cheval dans un plan vertical.



Pour notre goutte pendante en un point P de la surface, les deux courbures et les deux rayons de courbures sont ainsi :

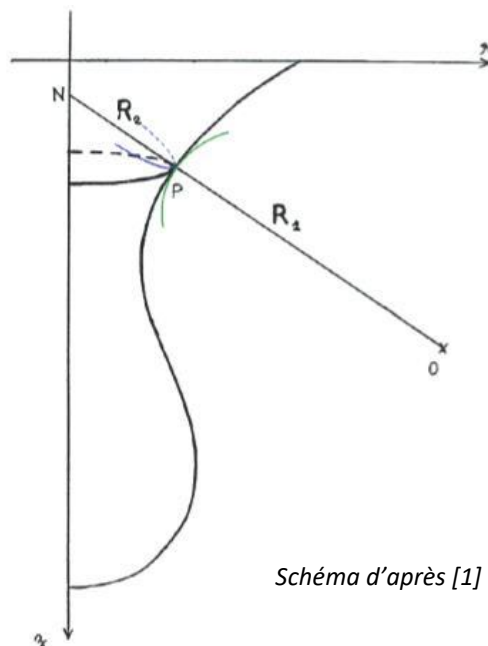


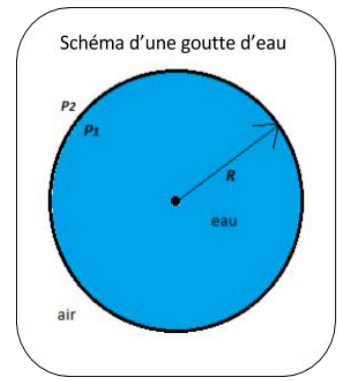
Schéma d'après [1]

Quand nous avons découvert cette loi, nous l'avons appliqué dans le cas d'une goutte sphérique, les deux rayons de courbures ont la même valeur. Et dans ce cas  $R_1=R_2=R$

$$\text{On a alors } \Delta p = p_1 - p_2 = \gamma \times \left( \frac{2}{R} \right) = \frac{2\gamma}{R}$$

Avec  $p_1$ , la pression dans la goutte et  $p_2$  la pression de l'air

Nous avons alors fait quelques calculs pour des gouttes d'eau de différents rayons avec  $\gamma = 73.10^{-3} \text{N.m}^{-1}$



R	<b>1<math>\mu\text{m}</math> = 1x10<sup>-6</sup> m</b>	<b>1mm</b>	<b>3mm</b>
$p_1 - p_2$	146 000Pa	146 Pa	48,7 Pa

Conclusion : Plus le rayon de la goutte d'eau est petit, plus la différence de pression entre les deux milieux est élevée. Autrement dit, **plus la goutte est petite, plus la pression à l'intérieur de celle-ci est grande**, ce qui peut paraître surprenant mais ce qui peut s'expliquer en considérant les interactions entre les molécules au niveau de l'interface.

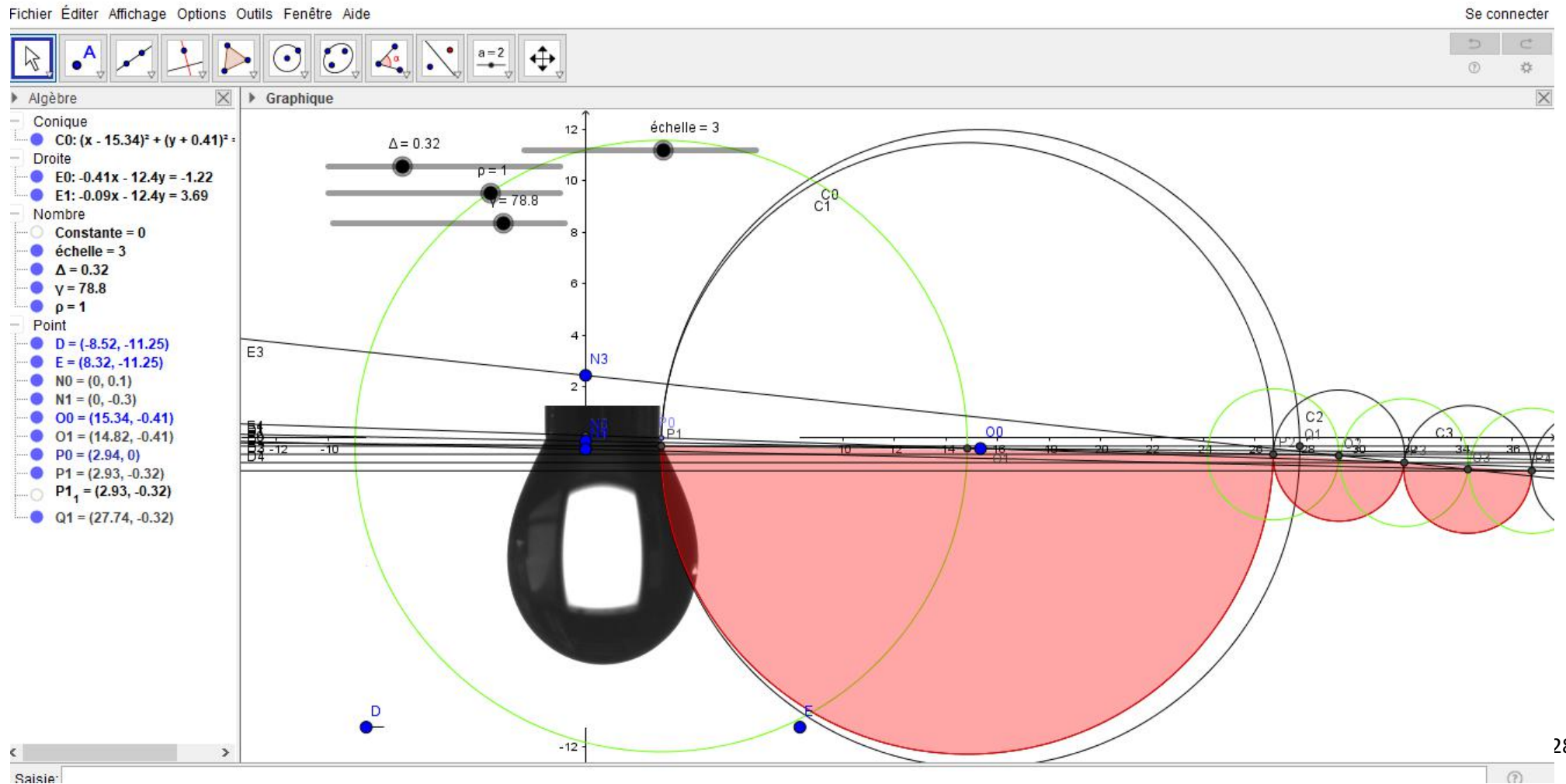
## Annexe 4

### Volume, rayon et masse d'une goutte d'eau savonneuse pour différentes concentrations en SDS

Solutions	Concentrations	Températures	Densité	Volume Total	Nombre de gouttes	Masse d'une goutte	Rayon	Volume d'une goutte
Unités	mol.L <sup>-1</sup>	en °C	pas d'unité	en mL	pas d'unité	en g	en cm	en mL
EAU DISTILLEE	0	20°C	0,99	25,0	405	0,0617	0,245	0,0617
SOL14: 0.0000983 mol.L	$9,83 \times 10^{-5}$	22,5°C	0,996	25,0	406	0,0615	0,244	0,0617
SOL13: 0.000983 mol.L	$9,83 \times 10^{-4}$	22.5°C	0,996	25,0	415	0,06	0,243	0,0602
SOL12: 0.002 mol.L	$2,00 \times 10^{-3}$	22°C	0,981	25,0	455	0,0539	0,235	0,0549
SOL11: 0.004 mol.L	$4,00 \times 10^{-3}$	21.7°C	0,988	25,0	556	0,0444	0,220	0,045
SOL10: 0.005 mol.L	$5,00 \times 10^{-3}$	22.3°C	0,972	7,2	192	0,0365	0,207	0,0375
SOL9: 0.006 mol.L	$6,00 \times 10^{-3}$	20.1°C	0,993	9,0	247	0,0362	0,2001	0,0364
SOL8: 0.007 mol.L	$7,00 \times 10^{-3}$	20.2°C	0,963	9,5	275	0,0333	0,1948	0,0345
SOL7: 0.008mol.L	$8,00 \times 10^{-3}$	20.1°C	0,97	9,5	289	0,0319	0,19	0,0329
SOL6: 0.009 mol.L	$9,00 \times 10^{-3}$	20.2°C	0,97	7,0	213	0,0319	0,19	0,0329
SOL4: 0.01 mol.L	$1,00 \times 10^{-3}$	21.9°C	0,982	25,0	741	0,0331	0,1925	0,0337
SOL3: 0.02 mol.L	$2,00 \times 10^{-3}$	22°C	0,989	15,0	467	0,0318	0,1878	0,0321
SOL2: 0.05 mol.L	$5,00 \times 10^{-3}$	22°C	0,997	10,0	324	0,0308	0,1841	0,0309
SOL1: 0.7 mol.L	$7,00 \times 10^{-3}$	22°C	0,991	9,5	313	0,0301	0,1826	0,0304

## Annexe 5

### Quelques aperçus de nos galères sur Géogebra (copies d'écran)



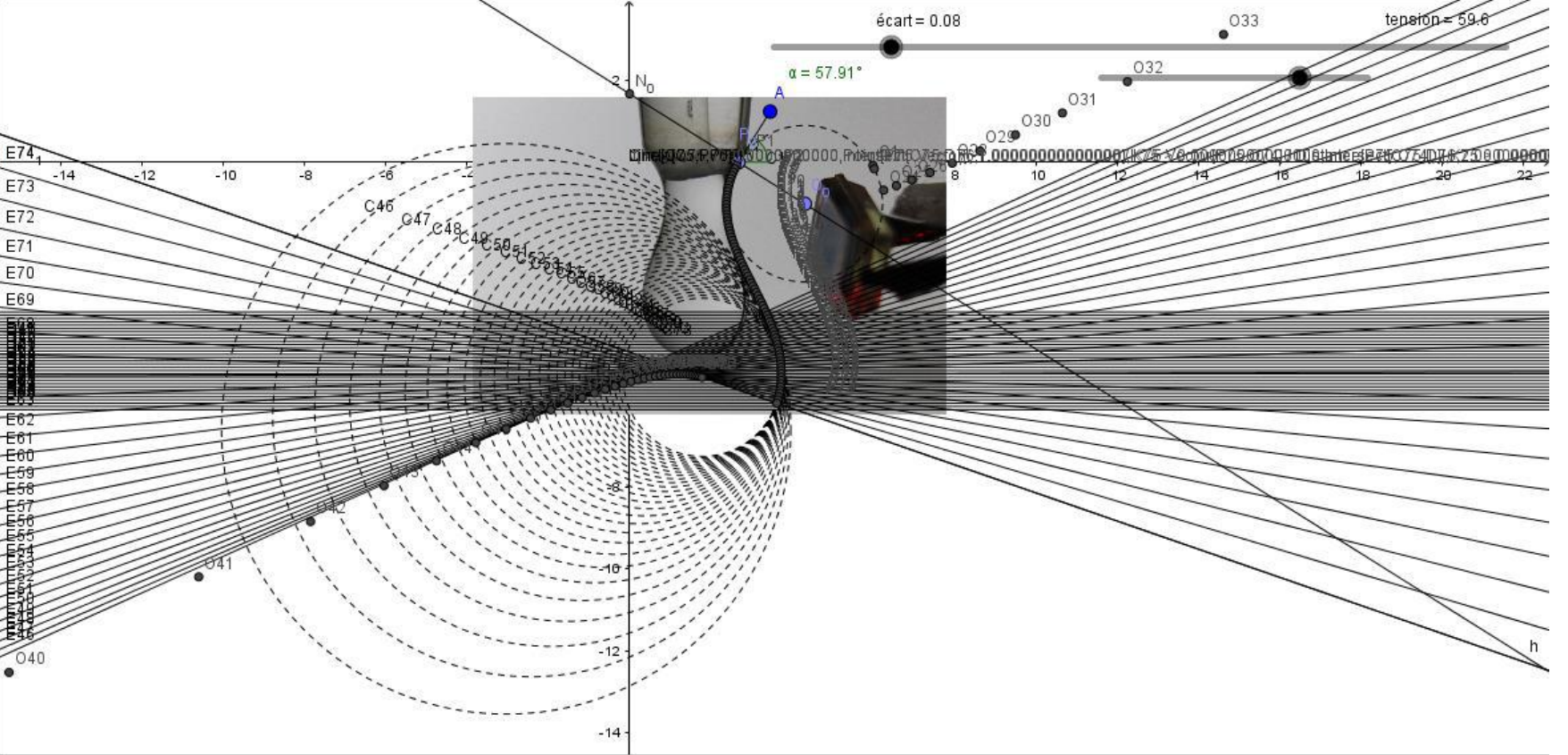




Algèbre

Graphique

- Angle
  - $\alpha = 57.91^\circ$
- Conique
  - $A_0 = 0.09$
  - $C_0: (x - 4.31)^2 + (y + 1.0$
- Droite
  - $h: -0.78x - 1.24y = -2.0$
- Nombre
  - $K1 = -0.52$
  - tension = 59.6
  - écart = 0.08
- Point
  - $A = (3.46, 1.24)$
  - $B = (5.8, 0)$
  - $C = (-3.86, -6.2)$
  - $D = (7.82, -6.2)$
  - $N_0 = (0, 1.68)$
  - $O_0 = (4.31, -1.02)$
  - $P_0 = (2.68, 0)$
- Segment
  - $g = 1.47$



## Les formules des premières lignes de notre tableur Géogébra

A	B	C	D	E	G	K	N	O	P
=1	=1	=Cercle(O1, P1) (7)	y = -B1 Δ (1)	=Droite(O0, P1) (3)	Symétrie(A1, x = 0)	=Constante - 1 / Distance(O0, P0) + 1 / Distance(P0, N0) - 1 / Distance(P1, N1) (5)	Intersection(x = 0, E1) (4)	=Si(K1 < 0, Point(P1, Vecteur(-1 / K1 Vecteur(P1, O0) / Distance(P1, O0))), K1 > 0, Point(P1, Vecteur(1 / K1 Vecteur(P1, N1) / Distance(P1, N1)))) (6)	=Intersection(C0, D1, 1) (2)
=Si(x(P3) > 0, Si(K2 < 0, ArcCercle(O2, P2, P3), K2 > 0, ArcCercle(O2, P3, P2)))	=B1 + 1	=Cercle(O2, P2) (14)	y = -B2 Δ (8)	=Si(x(P2) > 0, Droite(O1, P2)) (10)	Symétrie(A2, x = 0)	=Si(K1 > 0, Constante + 1 / Distance(O1, P1) + 1 / Distance(P1, N1) - 1 / Distance(P2, N2), K1 < 0, Constante - 1 / Distance(O1, P1) + 1 / Distance(P1, N1) - 1 / Distance(P2, N2)) (12)	Intersection(x = 0, E2) (11)	=Si(K2 < 0, Point(P2, Vecteur(-1 / K2 Vecteur(P2, O1) / Distance(P2, O1))), K2 > 0, Point(P2, Vecteur(1 / K2 Vecteur(P2, N2) / Distance(P2, N2)))) (13)	=Si(K1 < 0, Intersection(C1, D2, 1), K1 > 0, Intersection(C1, D2, 2)) (9)
=Si(x(P4) > 0, Si(K3 < 0, ArcCercle(O3, P3, P4), K3 > 0, ArcCercle(O3, P4, P3)))	=B2 + 1	=Cercle(O3, P3)	y = -B3 Δ	=Si(x(P3) > 0, Droite(O2, P3))	Symétrie(A3, x = 0)	=Si(K3 > 0, Constante + 1 / Distance(O3, P3) + 1 / Distance(P3, N3) - 1 / Distance(P4, N4), K3 < 0, Constante - 1 / Distance(O3, P3) + 1 / Distance(P3, N3) - 1 / Distance(P4, N4))	Intersection(x = 0, E3)	=Si(K3 < 0, Point(P3, Vecteur(-1 / K3 Vecteur(P3, O2) / Distance(P3, O2))), K3 > 0, Point(P3, Vecteur(1 / K3 Vecteur(P3, N3) / Distance(P3, N3))))	=Si(K2 < 0, Intersection(C2, D3, 1), K2 > 0, Intersection(C2, D3, 2))

## Annexe 6

### Le principe de la construction géométrique de l'algorithme

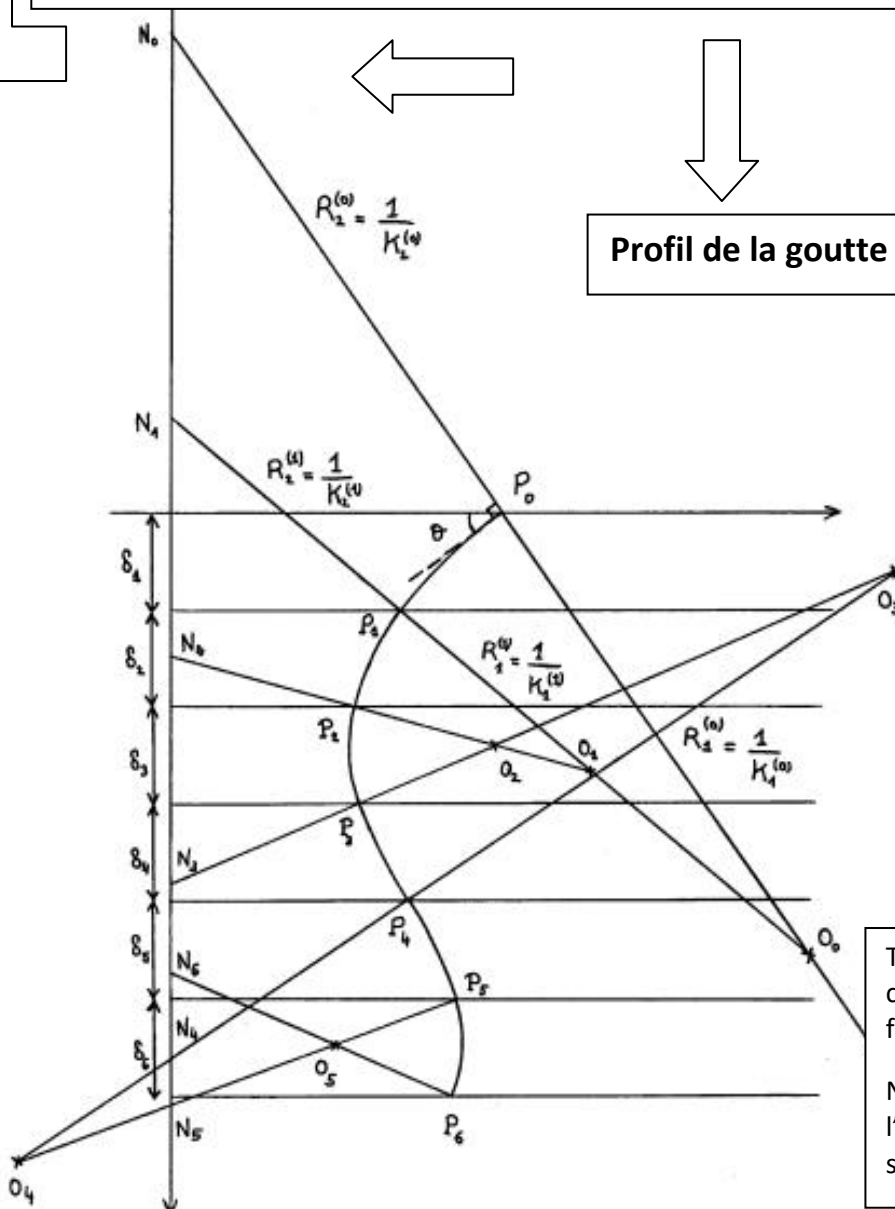
- On trace un arc de cercle (voir ci-dessous) qui épouse le contour de la goutte au niveau de l'accroche. Pour se faire, on doit placer le point  $O_0$  et on fixe ainsi la valeur de  $R_1^{(0)}$
- On en déduit la valeur du deuxième rayon de courbure  $R_2^{(0)} = N_0 P_0$
- Des deux rayons déterminés précédemment, on déduit la valeur de  $K_0$ .  
 $\Rightarrow$  L'arc de cercle  $C_0$  coupe la droite  $z = \delta$  au point  $P_1$ .

- On trace alors la droite  $O_0 P_1$  et on note son intersection  $N_1$  avec l'axe de symétrie.
- On en déduit la distance  $N_1 P_1$  qui nous permet de calculer le rayon de courbure  $R_2^{(1)}$  pour  $z = \delta$  et d'en déduire  $K_2^{(1)}$
- Il faut maintenant placer le point  $O_1$  pour pouvoir tracer l'arc de cercle suivant. Il faut donc connaître le rayon  $R_1^{(1)}$  et pour cela nous utilisons la relation Thomson-Laplace

$$K_0 + \frac{\rho g \delta}{\gamma} = (K_1^{(1)} + K_2^{(1)}) \quad \text{et donc} \quad K_1^{(1)} = K_0 + \frac{\rho g \delta}{\gamma} - K_2^{(1)}$$

- On trace un arc de cercle  $C_1$  de centre  $O_1$  et de rayon  $R_1^{(1)}$ .

Profil de la goutte



Thomson faisait ce travail "à la main", crayon, règle et compas ce qui devait être fastidieux.

Nous avons la chance de pouvoir utiliser l'outil informatique. Encore faut-il pouvoir se faire comprendre de lui..

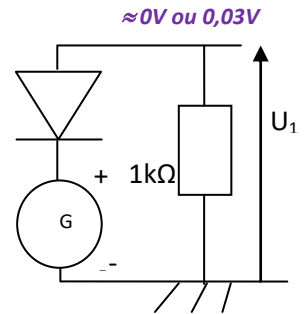
## Annexe 7

### Quelques précisions sur notre « compteur de gouttes »

Notre montage (évoqué au I) comporte plusieurs étapes :

#### a. Alimentation de la photodiode

On branche en inverse une photodiode sous une tension de 5V. Lorsqu'elle ne reçoit pas de lumière, elle bloque le passage du courant. Au contraire, elle laisse passer le courant en présence de lumière, de façon proportionnelle à l'éclairement. La photodiode est en série avec une résistance. D'après le voltmètre, la tension ( $U_1$ ) aux bornes de la résistance varie entre 0,03V (photodiode éclairée par le laser) et près de 0V (ombre sur la photodiode liée au passage de la goutte).

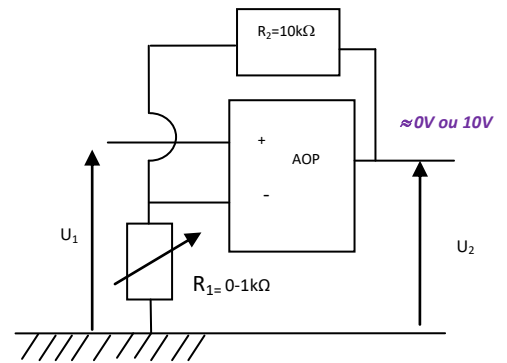


#### b. Amplification du signal

La tension ( $U_1$ ) aux bornes de la résistance en série avec la photodiode varie donc entre 0 et 0,03V. Cette différence est très faible, c'est pourquoi on va chercher à l'amplifier. Pour ce faire, on utilise un montage amplificateur utilisant un circuit intégré AOP qui va multiplier la tension qu'il reçoit.

La tension à la sortie de l'AOP est  $U_2 = U_1 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$  avec  $U_2$  la

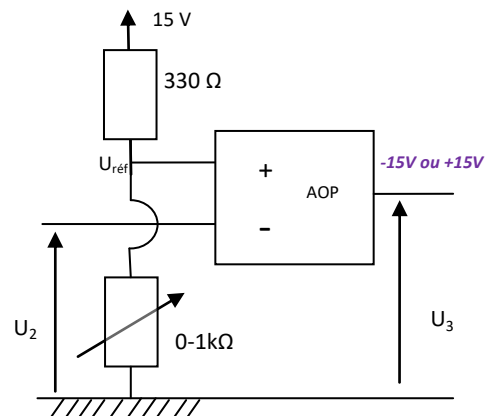
tension de sortie,  $U_1$  la tension d'entrée,  $R_1$  et  $R_2$  les résistances de ce montage. Après avoir changé de nombreuses fois les valeurs de  $R_1$  et  $R_2$  pour ajuster le facteur d'amplification, nous avons finalement adopté une résistance  $R_1$  variable. Celle-ci permet de modifier le facteur d'amplification selon les besoins en un tour de vis.



Avec les valeurs que nous avons choisies le facteur d'amplification peut donc varier de 0 à l'infini. Toutefois, nous avons remarqué qu'il n'était pas possible d'avoir une tension  $U_2$  de sortie supérieure à 15V, ce qui correspond à la tension d'alimentation de l'AOP. De plus, il n'est pas intéressant d'atteindre une tension supérieure à 10V car la carte d'acquisition que nous utilisons pour visualiser les tensions sature à 10V. Nous réglons donc généralement  $R_1$  afin d'avoir une tension de sortie  $U_2$  proche de 10V lorsque la photodiode est éclairée.

#### c. Comparaison avec une tension de référence

Notre signal ( $U_1$ ) fluctue donc entre environ 0-1V et 10V. Cependant, on a besoin, pour Arduino, d'une tension qui ne puisse prendre que deux valeurs, selon la présence ou l'absence de goutte devant le capteur. A l'origine nous souhaitions régler directement la tension à 0 ou 5V à l'aide du facteur d'amplification précédent, mais cela s'est avéré non fiable car de la lumière parasite suffit pour que la tension en soit modifiée. Nous avons donc réalisé un comparateur, qui compare la tension ( $U_2$ ) à une tension préalablement définie, nommée tension de référence. Si la tension  $U_2$  à l'entrée du



comparateur est supérieure à la tension de référence, alors on aura -15V en sortie. Dans le cas contraire, on aura +15V.

Pour réaliser ce comparateur, on utilise un second AOP. Pour la tension de référence, nous avons réalisé un diviseur de tension branché à la suite d'une alimentation de 15V, composé d'une résistance de 330Ω, et d'une résistance variable 0-1kΩ. Sans le savoir, la mise en place de ce comparateur a permis par la suite de commander à quelques dizaines de millièmes de seconde près notre appareil photo, au moment désiré, comme nous le verrons au paragraphe IV.

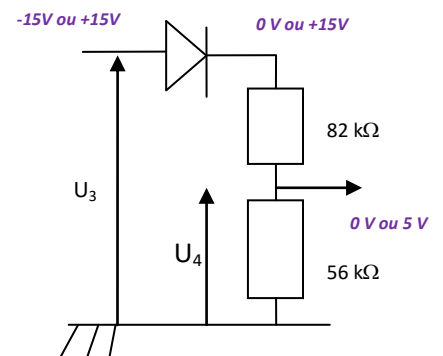
Nous avons donc une tension de -15V (absence de goutte) ou de 15V (passage d'une goutte) à la sortie de notre deuxième AOP. Mais Arduino requiert une tension de 0 ou 5V...

#### d. Passage de "-15/+15" à "0/5V"

Nous utilisons une diode, dont le rôle est de ne laisser passer le courant que dans un sens. Ainsi quand la tension  $U_3$  est de 15V, un petit courant passe dans la diode. L'intensité de ce courant s'annule quand la tension est de -15V. A la sortie de la diode, la tension  $U_3$  est désormais de 0 ou +15V.

Il ne nous reste à présent qu'à diviser cette tension par 3, afin qu'elle soit de 0 ou 5V. C'est pourquoi on utilise un deuxième diviseur de tension, composé, de résistances 56kΩ et 82kΩ. On obtient ainsi une tension  $U_4$  de 5V à la sortie de notre circuit lorsqu'une goutte cache la photodiode ou 0V dans le cas contraire.

Cette sortie va être reliée à l'une des entrées de la carte Arduino. Un petit sketch en langage Arduino écrit par Thibaut l'an passé, a été téléchargé dans le microcontrôleur et permet ainsi de comptabiliser facilement les gouttes à l'écran de l'ordinateur.



## Annexe 8

### La difficile recherche de reproductibilité de nos photographies

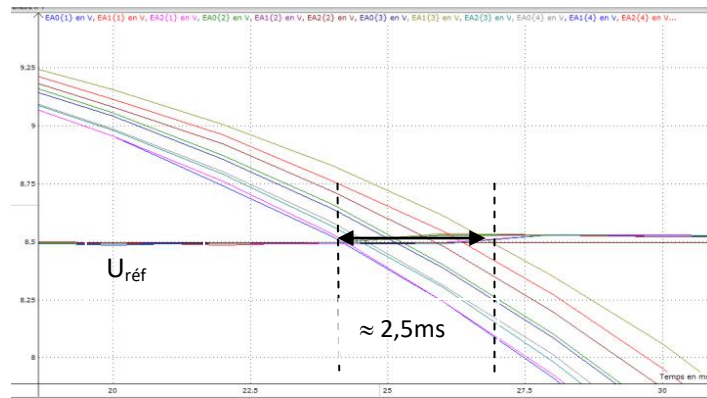
Si notre système électronique décrit au paragraphe I, nous permet de faire des photographies lors du détachement, nous n'obtenons pas des photos suffisamment reproductibles. Ainsi, pour un réglage donné, les photos successives obtenues n'étaient pas les mêmes. A titre d'exemple, nous ne parvenions à observer un pincement (**phase 2**) qu'environ une fois sur 10 environ.

Nous avons pensé dans un premier temps que ce problème était lié à une erreur dans la réalisation du circuit électronique. Nous avons alors réalisé un nouveau circuit imprimé, en veillant également à raccourcir les longueurs des pistes et à maximiser les surfaces de masse, afin d'éviter d'éventuelles interférences qui, selon nous, pouvaient également jouer un rôle dans le manque de reproductibilité de notre signal. En effet, si une des pistes capte des ondes radios, les électrons du circuit peuvent absorber de l'énergie, et, de fait, perturber le signal traversant le circuit. Nous avons également passé quelques heures à vérifier le fonctionnement de l'interrupteur, puis opté par le remplacer par un nouveau, car nous suspicions une erreur de branchement qui l'aurait endommagé. Finalement, cette réalisation n'a eu que peu d'effet sur la reproductibilité de nos photos.

Alors, après avoir éliminé l'hypothèse d'une défaillance électronique, nous nous sommes penchés sur les autres paramètres intervenant dans la réalisation d'une photo : la **reproductibilité du phénomène physique**, la **capacité de traitement de l'information par l'appareil photo**, les **perturbations extérieures**. Nous nous sommes posé de nombreuses questions sur le sujet. Parmi elles:

- L'appareil photo est-il en mesure de traiter assez rapidement chaque photo de façon à pouvoir se déclencher lorsque le signal suivant lui est envoyé ?
- Et si le phénomène de détachement d'une goutte n'était, de toute façon, pas reproductible ?
- La lumière émise par la Del haute lumineuse clignote un peu et envoie de la lumière parasite sur notre photodiode, ce qui peut modifier notre signal (?)
- Peut être que le laser, ou son positionnement pose un problème(?)
- Les mouvements, et autres déplacements trop proches de la burette ne seraient-ils pas eux aussi en cause (mouvements d'air) ? etc..

Avant de tenter de confirmer ou au contraire d'infirmer ces nombreuses hypothèses, nous avons pensé qu'il serait judicieux d'avoir une idée de la durée de chacune des phases de détachement, même approximatives. Pour ce faire, nous avons filmé la chute d'une goutte à l'aide d'une caméra grande vitesse (400 images par seconde). Nous avons ensuite étudié les vidéos obtenues image par image. Sachant que la durée entre deux images successives est de 2,5ms nous avons pu en déduire que si la phase 1 dure aux environs de 40 ms, les phases suivantes sont bien plus rapides. La formation d'un pincement, puis le détachement réel de la goutte ne durent chacune qu'environ 2 ou 3 ms ! En effet, nous ne sommes pas parvenus, avec cette caméra, en passant le film image par image à observer systématiquement le pincement, preuve que ce dernier ne dure pas même 2,5 ms. Nous ne nous attendions absolument pas à observer des valeurs si faibles. Le défi était plus relevé que prévu! Surpris, nous avons repris notre dispositif électronique de photographie, et nous avons étudié plus en détail les courbes  $U_2=f(t)$  lorsque  $U_2$  se rapproche de la valeur  $U_{réf}$ . Nous nous sommes ainsi aperçus que si ces dernières nous avaient semblé reproductibles, c'est bien parce que nous ne les avons pas étudiées à la bonne échelle. En effet, en agrandissant les enregistrements jusqu'à obtenir un axe du temps graduée en ms, nos courbes n'étaient pas aussi reproductibles que nous le pensions. Le taux de variation était ainsi parfois bien supérieur à 10 ms, durée totale de fin de formation et détachement de la goutte. Il était donc totalement vain d'espérer obtenir des photos reproductibles dans une telle situation !



*Superposition de courbes  $U_2 = f(t)$  obtenues lors du passages successifs des gouttes*

La « lutte contre le temps » a alors débuté. Nous avons en effet tenté de nous rapprocher toujours plus d'une précision à la milliseconde, un défi long et périlleux.

Nous avons fait de très nombreuses tentatives afin d'atteindre la reproductibilité souhaitée. Il serait trop long ici de détailler tous nos essais. Nous pouvons néanmoins affirmer que l'électronique et la gestion de l'image par l'appareil photographique ne sont pas en cause.

Nous avons par contre pu améliorer la reproductibilité en protégeant l'environnement de notre goutte. Nous étions convaincus que, puisqu'il existe des comptes gouttes donnant des gouttes très similaires d'une fois sur l'autre (utilisés par exemple pour doser certains médicaments), le phénomène est, en lui-même, reproductible. Par conséquent, nous nous sommes questionnés sur les conditions d'environnement. Le critère que nous avons étudié en premier, puisqu'il nous semblait le plus évident, concernait les mouvements, et autres perturbations. Il est ainsi possible d'observer à l'« œil nu » que lorsque quelqu'un marche dans l'atelier, la goutte pendante tremble et la courbe  $U_2 = f(t)$  est modifiée. Par conséquent, nous essayions toujours d'être le plus discret possible (ne pas marcher, ne pas parler...) lors de nos prises de photos. Toutefois, certaines perturbations sont inévitables dans un lycée. Nous avons alors conçu une boîte visant à réduire le plus possible le contact entre la table d'expérimentation (puisque cette dernière est en contact direct avec le sol) et notre dispositif. Nous avons alors réalisé un support en bois avec patins en feutre. Nous y avons ajouté d'autres parois afin de former une boîte, pour protéger au maximum la photodiode des lumières parasites et la goutte des mouvements d'air.

Nous sommes d'autant plus frustrés dans nos recherches qu'il est tout à fait possible d'obtenir des signaux parfaitement reproductibles (à 0,1ms !) mais il faut pour cela descendre légèrement le couple laser-photodiode. Ainsi, la goutte coupe le faisceau plus tardivement et le signal  $U_2$  descend très rapidement. La reproductibilité est excellente. Mais le problème est que la goutte est déjà partie! Nous ne photographions que la goutte satellite!