

# Lancer un défi à une petite goutte... ...c'est physique !

*ou*

*Comment porter une expérience classique de notre lycée ...  
à l'échelle d'une goutte ?*

David BARBIN

Arnaud GOUBIL

Florian LE BEGUEC

Maël MOLAS

Professeur encadrant: M.MICHEL

**Lycée Douanier Rousseau-LAVAL**

## Résumé

Notre projet est de reproduire une expérience classique de chimie au lycée... mais à l'échelle d'une goutte. C'est beaucoup plus difficile que nous le pensions et nous devons relever de nombreux défis inattendus comme: Quel récipient offrir à notre goutte, pour remplacer le bécher que nous utilisons au lycée? Comment remplacer l'agitateur magnétique et assurer un mélange réactionnel homogène à une si petite échelle? Comment concevoir une sonde conductimétrique adaptée pour analyser le contenu d'une goutte? Comment mesurer l'absorbance d'une goutte colorée ? Ces questions et bien d'autres ne trouvent pas réponses dans nos livres de lycée. Nous nous sommes donc inspirés des travaux de recherche universitaire en microfluidique pour, avec l'aide de nos partenaires, imaginer, mettre en œuvre, tester et améliorer progressivement un dispositif qui répond à nos attentes. Nous sommes heureux de le présenter, car il est pour nous le fruit d'un très long travail de recherche, avec de nombreuses galères mais aussi quelques belles satisfactions.



*Dans «notre» atelier. De gauche à droite, Florian, David, Arnaud et Maël*

## Remerciements

Nous tenons à remercier nos partenaires, à commencer par le laboratoire Moltech d'Angers. Nous y avons été accueillis par M.Sourisseau et M.Ségut, qui nous ont consacré un après-midi entier à rechercher des solutions à nos problèmes. Nous remercions également l'école d'ingénieur ESIEA à Laval et tout particulièrement M.Crison et M.Lefas qui nous ont chaleureusement accueillis, aidés et qui ont accepté de nous prêter leur machine-outil, indispensable dans la réalisation de notre cellule millifluidique. Nous remercions vivement M.Lebouquin, de l'hôpital de Vannes pour nous avoir fourni les indispensables pousse-seringues. Sans eux, notre projet n'aurait pas été aussi abouti qu'il l'est aujourd'hui.

Nous tenons également à remercier les anciens de l'atelier qui s'intéressent à nos travaux, et notamment Lucie, qui nous a aidé à comprendre le principe d'un titrage conductimétrique.

Nous remercions les préparateurs du Lycée, Alain Buttier et Sabrina Conan, toujours disponibles dès que nous avons une demande de matériel.

Enfin nous remercions M.Michel, sans qui rien de tout cela ne serait possible !

# **SOMMAIRE**

Résumé-Remerciements

**I. L'origine de notre projet**

**II. Quel récipient pour une goutte ?**

**III. Comment s'inspirer des chercheurs « pros » ?**

**IV. Comment réaliser un mélange réactionnel à l'échelle d'une goutte?**

**V. Comment mesurer la conductivité d'une goutte?**

**VI. Un nouveau départ**

Conclusion-Perspectives

Bibliographie-Webgraphie

## I. L'origine de notre projet

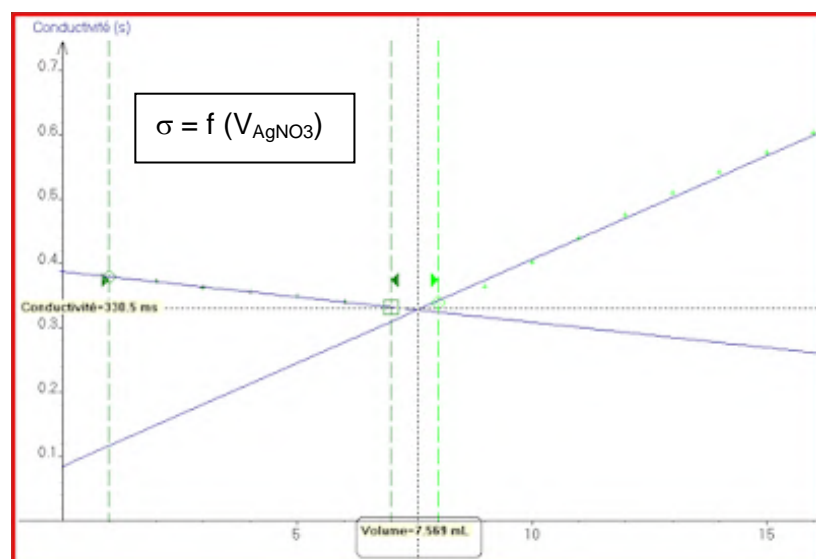
(septembre 2018)

A l'été 2018, nos anciens camarades de l'atelier scientifique, porteurs du projet: "Que peut nous apprendre une simple goutte?[1]", ont quitté le lycée non sans nous proposer un défi que nous avons fait nôtre depuis presque dix huit mois. Ce défi consiste à reproduire une expérience classique de lycée en chimie...mais à l'échelle d'une goutte! Dans notre lycée, une salle, réservée spécifiquement pour ces projets, nous est toujours ouverte. Nous y travaillons dès que nous avons un moment de libre dans la semaine et parfois pendant les vacances ou le soir, encadré par notre professeur et aidés de nos partenaires. Naïvement, nous pensions que ce défi serait vite relevé... mais que de difficultés et de défis à surmonter depuis!

Nous avons demandé à notre professeur, M.Michel, de nous proposer une expérience classique en chimie au lycée à reproduire à l'échelle d'une goutte. Il nous a proposé le titrage d'une solution de sérum physiologique ( $\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ ), par une solution de nitrate d'argent ( $\text{Ag}^+ + \text{NO}_3^-$ ) par suivi conductimétrique. Le nitrate d'argent est ajouté progressivement dans le bécher contenant la solution salée et l'homogénéisation est assurée par un agitateur magnétique. A chaque ajout, nous mesurons la conductivité du mélange, à l'aide de la cellule conductimétrique et de notre conductimètre. Le relevé des valeurs de conductivité du mélange réactionnel et la rupture de pente de la courbe tracée ( $\sigma$  en fonction de  $V_{\text{AgNO}_3}$ ) nous permettent d'en déduire la concentration en sel du sérum physiologique. Lucie, une "ancienne" de l'atelier, est venue nous prêter main forte pour réaliser avec nous ce dosage et bien exploiter la courbe, car nous n'étions alors qu'au début de notre année de première. L'exploitation de cette courbe et la détermination de la concentration en sel du sérum physiologique sont reportées en annexe 1.



Florian réalisant le titrage



Courbe représentant la conductivité  $\sigma$  du mélange en fonction du volume de nitrate d'argent ajouté  $V_{\text{AgNO}_3}$ .

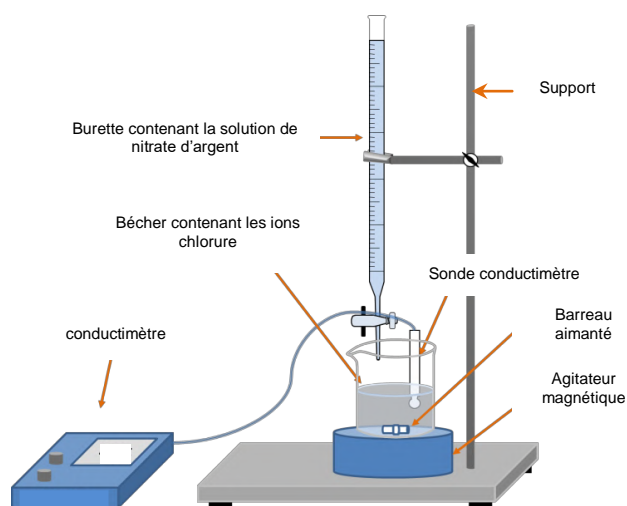


Schéma de notre montage

Pour réaliser ce titrage, nous avons consommé environ 20mL de solution de nitrate d'argent et environ 20mL de solution de chlorure de sodium ( $\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ ).

Notre défi était alors de reproduire la même courbe mais en utilisant seulement quelques gouttes!

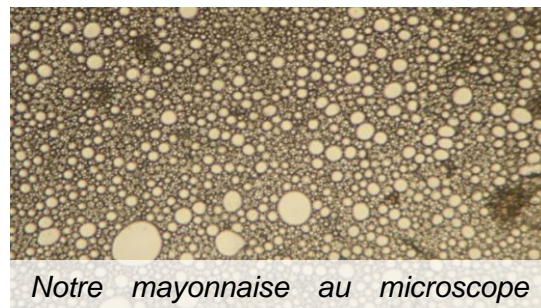
## II. Quel récipient pour une goutte?

(de septembre à novembre 2018)

Notre premier défi a consisté à trouver un récipient pour notre goutte! En effet, au lycée, nous avons des erlenmeyers, des béchers, des burettes... mais quel récipient utiliser pour une petite goutte ?

Nous avons assez vite pensé à utiliser de l'huile, car nos gouttes qui sont essentiellement formées d'eau n'y sont pas miscibles. Nous avons commencé par remplir un bécher d'huile de tournesol et à l'aide d'une pipette à doigts, nous y avons déposé des gouttes d'eau. L'eau étant plus dense que l'huile, elles tombent au fond du récipient et y coalescent plus ou moins rapidement.

On a alors spontanément agité le contenu du bécher, ce qui forme une émulsion (des gouttes d'eau dispersées dans de l'huile). Cette émulsion est très instable, et très rapidement, le mélange se décante. Il existe pourtant des émulsions stables telles que la mayonnaise, qui est une émulsion du quotidien. Nous en avons réalisé une, en avons déposé une pointe de spatule sur une lame de microscope, l'avons pressée légèrement avec une lamelle, l'avons observée et photographiée. Sur la photographie ci-jointe, on observe des gouttes d'eau dans de l'huile, c'est-à-dire des micelles. Mais on constate que leur taille est très aléatoire. La stabilité de celles-ci nous conviendrait car nous pouvons les observer longtemps au microscope. Nous avons appris que cette stabilité était due à la présence de tensioactifs (la lécithine) dans le jaune d'œuf, molécules qui permettent de faire le lien entre l'eau et l'huile. Nous avons au laboratoire des tensioactifs, tel que le SDS (Dodécylsulfate de Sodium), que nous pourrions utiliser pour stabiliser des gouttes dans de l'huile. Malgré tout, la diversité des tailles de micelles obtenues par agitation ne peut nous convenir. Notre but est d'obtenir des gouttes identiques et de tailles connues.



### Comment procéder pour former des gouttes stables et identiques ?

Nous avons repris notre première observation, à savoir la chute des gouttes d'eau dans de l'huile dans un tube à essais ou un bécher. Tant qu'elle tombe, la goutte semble stable et reste bien isolée, ce qui nous convient. Au lieu d'utiliser notre pipette à doigts, nous avons utilisé un pousse-seringue récupéré dans un hôpital et qui nous permettent de bénéficier d'un débit constant et réglable (entre 0 et 100 mL par heure).

### Mais, nos gouttes sont-elles toutes identiques et de même volume, comme cela semble être le cas à l'œil nu?

On remarque que nos gouttes nous apparaissent toutes elliptiques dans le tube à essais. Le phénomène de réfraction et la forme du tube en sont la cause. Pour éviter cette déformation optique, nous avons fabriqué une cuve à faces parallèles en bois et en plexiglas de 13 cm de largeur, 20 cm de hauteur et 3 cm d'épaisseur... Nous l'avons remplie d'huile.



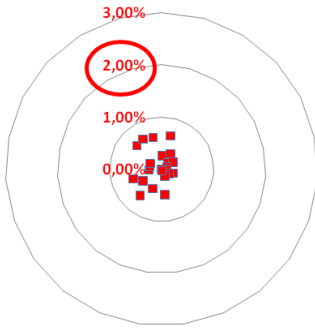
Notre bille de référence dans notre cuve à faces parallèles remplie d'huile

Gouttes "elliptiques" générées par un pousse-seringue, en mouvement dans un tube à essais rempli d'huile



Nous avons pris des photos de nos gouttes et les avons analysées afin de déterminer leurs rayons. Nous avons pour cela utilisé le logiciel Image J, aidés par sa notice [2]. Nous précisons ce travail dans l'annexe 2.

Dans un premier temps et afin de vérifier la fiabilité de notre méthode, nous avons testé celle-ci avec une bille témoin. Nous l'avons prise une vingtaine de fois en photo à différentes hauteurs. L'analyse numérique des photos nous permet d'obtenir le diamètre de notre bille, et d'en déduire son volume.



Nos mesures de diamètre pour la bille test

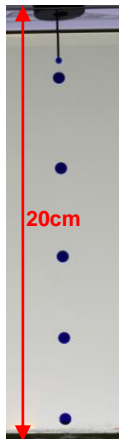
La moyenne des diamètres nous donne 0,990 cm. Nous avons cherché à visualiser la dispersion des mesures autour de cette moyenne en nous aidant notamment du livre de terminale [7] qui nous propose une représentation visuelle de cette dispersion. On considère une cible dont le centre correspond à la valeur moyenne et on place les mesures à une distance du centre qui correspond à l'écart relatif par rapport à la valeur moyenne.

Par exemple si pour une mesure du diamètre, on trouve  $D_1=0,985\text{cm}$  alors l'écart relatif est : 
$$\frac{|D_1 - D_{\text{moy}}|}{D_{\text{moy}}} \times 100 = \frac{|0,985 - 0,990|}{0,990} \times 100 = 0,51\%$$

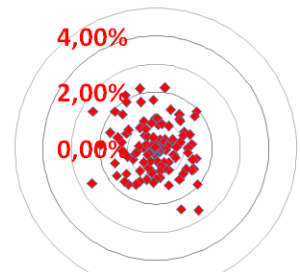
On remarque que toutes nos mesures sont très proches de la valeur moyenne (écarts tous inférieurs à 1%). Nous pensons à plusieurs erreurs possibles pour justifier ces écarts faibles mais non nuls ! Peut-être est-ce :

- ✓ Un manque de contraste entre le fond éclairé et la bille, ce qui est préjudiciable pour l'analyse numérique de l'image ?
- ✓ Des erreurs de parallaxe malgré que nous nous intéressons à une sphère et que nous avons cherché à minimiser ces erreurs en plaçant l'appareil photographique à la même hauteur que celle de la bille ?
- ✓ Des erreurs liées encore à la réfraction, erreurs que nous avons tenté de réduire en plaçant l'appareil bien perpendiculaire aux faces de notre cuve.

Malgré tout, la méthode nous semble tout à fait fiable et nous avons décidé de l'appliquer à nos gouttes générées par un pousse seringue et en chute dans l'huile.

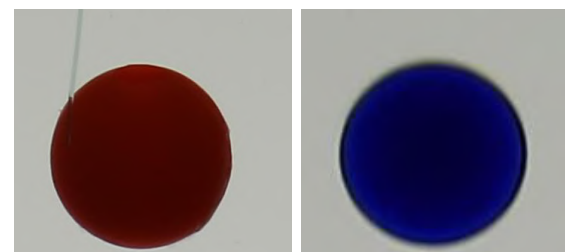


Nous avons pris une vingtaine de photos contenant 5-6 gouttes, ce qui au total représente une centaine de gouttes et donc de mesures. La répartition selon la même méthode que précédemment donne une dispersion des diamètres mesurés un peu plus grande qu'avec notre bille test, mais aucun des écarts n'excède les 2%.



Répartition des mesures de diamètre pour nos gouttes

Nous pensons pouvoir justifier la plus grande dispersion de nos mesures avec les gouttes. En effet, il est important pour notre méthode numérique qu'il y ait un très bon contraste entre les gouttes et le fond afin que les contours soient bien déterminés. Or contrairement à notre bille, la goutte n'est pas opaque. L'épaisseur de solution traversée par la lumière est maximale au centre de la goutte et diminue lorsqu'on s'éloigne du centre. Par ailleurs, la goutte d'eau est plus petite que la bille et en mouvement, ce qui complique la prise d'image.



La bille de référence à gauche aux contours très contrastés et la goutte bleue dont les contours le sont moins.

Malgré ces remarques, nous pensons avoir trouvé le moyen de produire et d'isoler des milliréacteurs stables, de volume identique. Par ailleurs, nous pouvons à l'aide de l'indication des pousse- seringues déterminer sans peine le volume d'une goutte en calculant le rapport :

$$\text{volume de nos gouttes (en mL)} = \frac{\text{Débit du pousse seringue (en mL/h)}}{\text{Débit de gouttes (en gouttes/h)}}$$

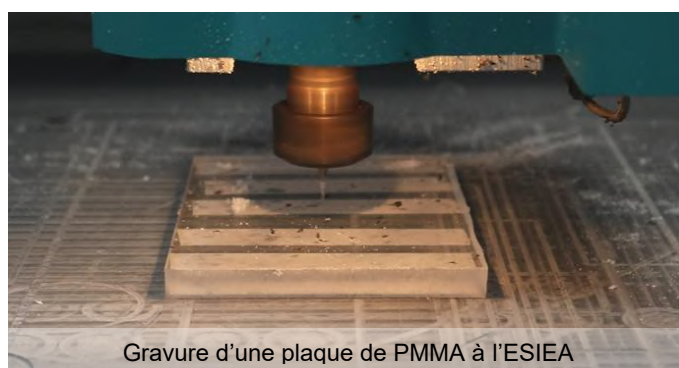
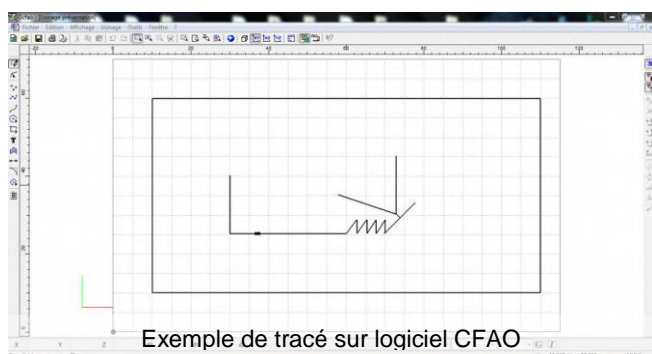


### III. Comment s'inspirer des chercheurs « pros » ?

(de octobre à novembre 2018)

Pour effectuer un mélange réactionnel à l'échelle d'une goutte et le faire circuler dans un fluide porteur tel qu'une huile végétale, nous nous sommes inspirés des méthodes utilisées en microfluidique. Un article notamment [3] nous a beaucoup inspiré. Pour ce faire, nous devons créer un environnement stable et contrôlé. Evidemment, il nous est difficile de reproduire les dispositifs réalisés dans les laboratoires de recherche, où des microcanaux de largeur 1 micromètre sont gravés dans des plaques de silice, à l'intérieur de salles blanches ! Nous nous sommes modestement inspirés de ces travaux de vrais chercheurs, pour après bien des déboires, imaginer, réaliser et améliorer progressivement notre propre cellule millifluidique.

Actuellement nous procédons ainsi: Nous dessinons nous-mêmes nos circuits sur "Charlie Graal", un logiciel de CFAO (Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur). C'est à cette étape que nous nous concertons et choisissons les points d'entrée et de sortie des fluides, la longueur, largeur et la forme des canaux, ainsi que les angles des intersections entre canaux.



Toutes ces caractéristiques doivent être appliquées à une plaque de PMMA, de l'Anglais PolyMethylMethAcrylate, matériau choisi pour sa transparence, sa facilité d'usinage et son prix dérisoire. Pour ce faire, l'ESIEA, une école d'ingénieurs de Laval, nous met gracieusement à disposition une MOCN (Machine-Outil à Commandes Numériques). En utilisant directement nos plans préconçus depuis le logiciel de CFAO, les canaux sont gravés, et la plaque découpée.

Les premières gravures ont été laborieuses, et alors que nous pensions n'y passer que quelques minutes, c'est à chaque fois un long après midi qu'il nous a fallu. Désormais, nous maîtrisons mieux le procédé, et en une heure, nous pouvons graver plusieurs petites cellules.

Ensuite, afin d'assurer l'étanchéité du système, nous recouvrons cette plaque de PMMA avec une plaque de PDMS (PolyDiMéthylSiloxane). C'est un polymère très utilisé depuis vingt ans dans le domaine de la recherche en microfluidique, car il permet d'obtenir un matériau très souple, très transparent et peu onéreux. Le PDMS se présente initialement sous la forme d'un liquide très visqueux, et doit par conséquent être réticulé. Nous avons appris à préparer nous-mêmes ce matériau. En une heure et demie environ, nous pouvons réaliser une plaque par réticulation puis moulage, dégazage et étuvage à 60°C. Notre protocole est détaillé à l'annexe 3.

Le PDMS est ensuite percé, afin d'introduire les fluides dans les points d'entrée et sortie des canaux. Dans le laboratoire de recherche, les plaques de PDMS sont collées sur du verre par un procédé physico-chimique, dans une chambre à plasma. Nous procédons bien sûr autrement.

En utilisant une autre plaque de PMMA au-dessus et en vissant les deux plaques de PMMA ensemble, le PDMS se retrouve coincé et ne bouge plus. L'étanchéité est donc assurée par un léger pressage.

Il ne nous reste plus qu'à enfoncer des tubes, passants par les trous de la première plaque de PMMA, ainsi que par les trous du PDMS, afin d'alimenter les canaux en fluides.

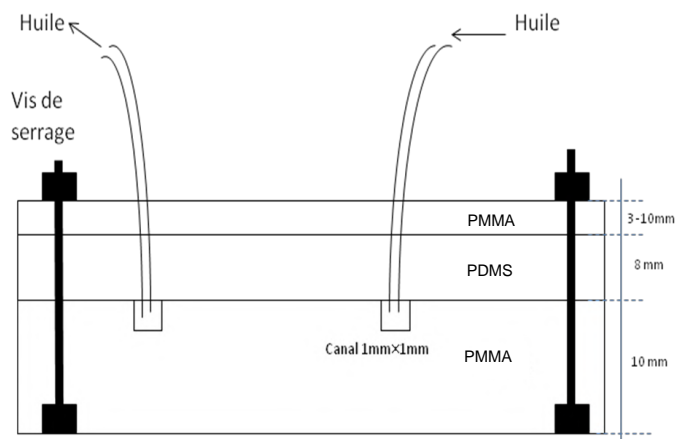
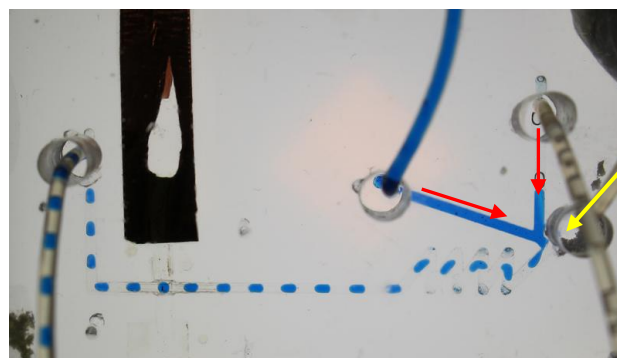
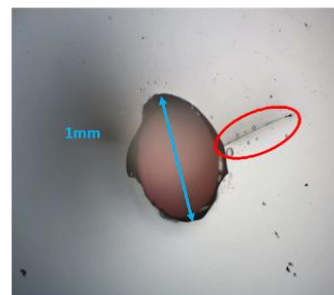


Schéma de coupe de notre cellule



L'une de nos cellules (vue du dessus). Les deux flèches rouges indiquent l'arrivée des deux réactifs et la flèche jaune l'arrivée du milieu porteur : huile de Tournesol

Il nous a fallu beaucoup d'essais afin de parvenir à la réalisation actuelle, et notre "cimetière" à essais s'est beaucoup étendu pendant les plusieurs mois durant lesquels nous avons mis au point ce procédé. Nous avons fait des essais de gravure dans du PDMS, de collage avec du verre etc... avant de renoncer. Egalement, parmi les nombreux problèmes que nous avons rencontré pour réaliser nos cellules actuelles, il y a les mauvais montages, les moules à PDMS qui fondent dans l'étuve, les plaques PDMS trop épaisses ou mal débullées, les tubes non alignés avec les canaux, et les fuites qu'il nous faut éviter. Par exemple, on s'est rendu compte que même si les tubes semblaient bien adaptés, au final au microscope on voit des microfissures dans le PDMS qui étaient les causes de nos soucis. Depuis lors, nous procédons à l'assemblage avec beaucoup de précautions et sous une lampe-loupe.



Notre « cimetière » à cellules, plaques de PDMS et moules...

#### IV. Comment réaliser un mélange réactionnel homogène à l'échelle d'une goutte ?

(de février 2019 à mars 2019)

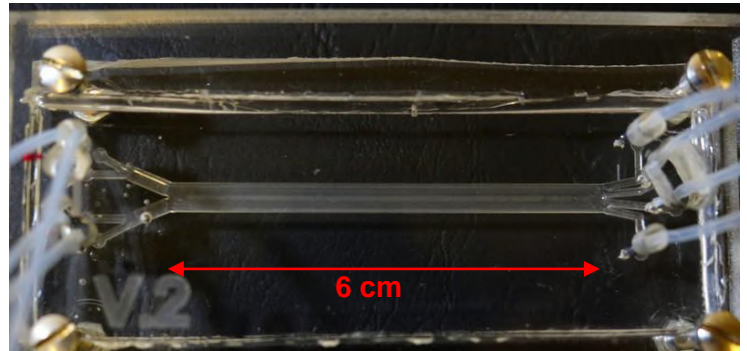
Comme en séance de TP de chimie, il nous faut nous assurer d'une homogénéisation rapide du mélange réactionnel avant de pouvoir réaliser une mesure. Nous avons écarté rapidement l'idée d'une agitation mécanique (agitateur magnétique + turbulent par exemple), car notre volume de goutte est décidément trop petit. Comment faire alors? Encore une fois, nous nous sommes inspirés de l'article [3], écrit par des chercheurs du laboratoire de génie chimique de Toulouse. Il existe deux régimes majeurs



d'écoulement d'un fluide: le régime laminaire et le régime turbulent. Cet article nous apprend que le régime d'écoulement des fluides dans les canaux microfluidiques est laminaire, ce qui ne favorise pas l'homogénéisation des gouttes dans ces canaux. Quelques recherches sur Internet et la lecture d'un des articles du livre [4] nous ont permis de découvrir le travail de Reynolds et notamment le nombre qui porte son nom. Inspirés par la première page du magazine "Science", nous avons voulu vérifier à la fois par l'expérience et par le calcul si le régime d'écoulement de nos fluides dans nos canaux, non pas micrométriques mais millimétriques, est lui aussi nécessairement laminaire.

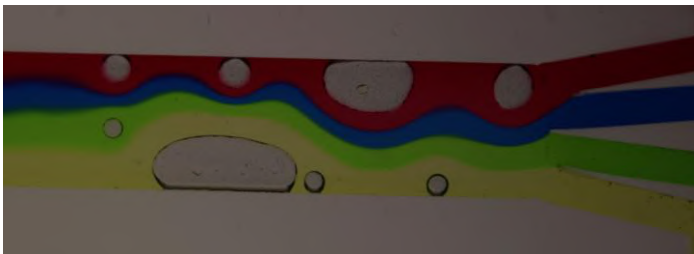


Nous avons pour cela gravé dans du PMMA, de la même manière que pour les autres cellules, un canal large de 4,0 mm, de 1,0 mm de profondeur et de longueur 6 cm. Nous avons réalisé 4 entrées différentes et 4 sorties, ce qui nous permet de faire entrer et sortir 4 solutions aqueuses et donc miscibles, qui se distinguent uniquement par leur couleur. La mise en place de cette cellule dédiée à cette démonstration n'a encore une fois pas été aussi simple et rapide que prévu. Il faut notamment quatre débits bien identiques car les fluides se "font la guerre" à l'entrée, dans le canal principal. Certains liquides remontent dans des tubulures, et les pousses seringues nous ont souvent alertés d'une occlusion par leurs «bips» très forts et assez aigus. Nous avons alors fait une deuxième version, en nous inspirant davantage de la devanture du magazine "Science", où l'on aperçoit les fluides injectés progressivement les uns après les autres, et non pas tous au même niveau.



Cellule «à vide » pour vérifier le régime d'écoulement dans nos canaux.

Cette nouvelle version, que l'on appelle «V2», fonctionne bien mieux, même si elle est imparfaite par rapport à nos premières attentes. En effet, nous avons été embêtés par des bulles d'air qui s'invitent facilement et que nous avons longuement tenté de supprimer... Finalement, après réflexion et à force d'observations, nous avons admis qu'elles pouvaient être les bienvenues. En effet, on constate que les fluides contournent très bien ces obstacles, susceptibles de créer des perturbations. Lorsque nous tentons d'en créer nous mêmes en agitant les tubulures d'entrées, les fluides sont perturbés mais le régime redevient très vite laminaire, régime qui semble donc bien établi.



Des bulles d'air dans le canal principal...



...et sans bulles dans ce même canal

La détermination du nombre de Reynolds confirme nos observations.

Ce nombre dépend de :

- $\rho$ , la masse volumique du fluide (en  $\text{Kg.m}^{-3}$ )
- $V$ , la vitesse moyenne du fluide (en  $\text{m.s}^{-1}$ )
- $d$ , la dimension typique du canal (diamètre, largeur..en m)
- $\eta$ , la viscosité du fluide qui s'écoule (en  $\text{Pa.s}$ ), grandeur qui traduit la résistance du liquide au glissement des couches de fluides les unes par rapport aux autres et dont une grande valeur favorise le régime laminaire de l'écoulement.

Reynolds constate que dans un écoulement, les turbulences apparaissent lorsque le rapport  $\mathfrak{R}_e = \frac{\rho V d}{\eta}$  dépasse une valeur seuil d'environ 3000.

Dans notre canal où " $d$ " =  $4.10^{-3}$  m avec des solutions aqueuses de masse volumique et de viscosité proches de celles de l'eau ( $\rho = 10^3 \text{ Kg.m}^{-3}$  ;  $\eta = 10^{-3} \text{ Pa.s}$ ) et pour une vitesse d'écoulement d'environ  $5,6 \text{ cm.s}^{-1}$  ;

$$\mathfrak{R}_e = \frac{\rho V d}{\eta} = \frac{1.10^3 \times 5,6.10^{-2} \times 4.10^{-3}}{10^{-3}} \approx 220$$

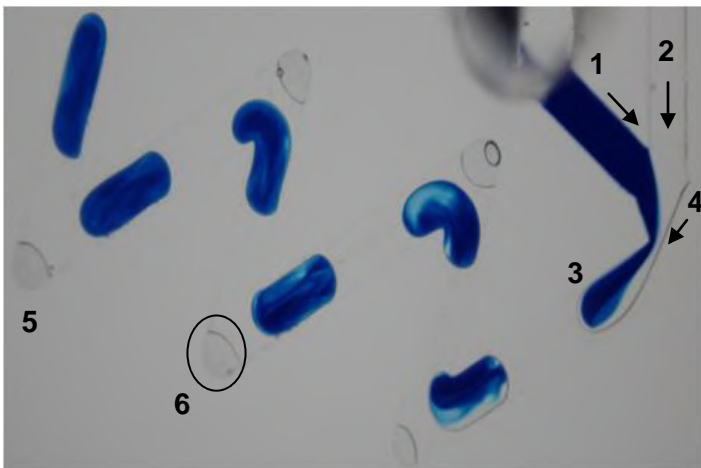
On calcule un rapport égal à 220 donc très inférieur à 3000.

Avec de l'huile de tournesol qui est l'huile que nous utilisons ( $V = 5,6.10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$  ;  $\eta = 0,1 \text{ Pa.s}$  ;  $\rho = 900 \text{ Kg.m}^{-3}$ ) et pour un canal plus fin d'un millimètre on trouve un rapport égal à :

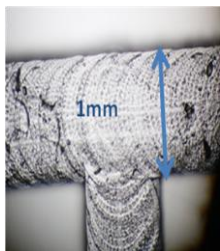
$$\mathfrak{R}_e = \frac{\rho V d}{\eta} = \frac{900 \times 5,6.10^{-2} \times 1.10^{-3}}{0,1} \approx 0,50 \ll 3000$$

Avec les dispositifs de recherche utilisés en laboratoire et leurs canaux micrométriques, le nombre de Reynolds est encore plus faible. Le régime laminaire est omniprésent dans ces canaux. Très clairement nous ne pouvons pas espérer des turbulences dans nos canaux afin de mélanger le contenu des gouttes.

Comment faire alors pour homogénéiser nos gouttes de mélange dans ces conditions ?



coude après coude la goutte s'homogénéise et forme à la sortie du cinquième coude (5) un mélange homogène. On peut expliquer cette homogénéisation en considérant que les couches de fluides sont « malaxées », tout comme l'est la pâte d'un boulanger qu'il plie et replie. Cela permet l'homogénéisation du mélange.



Le fond de notre canal au microscope

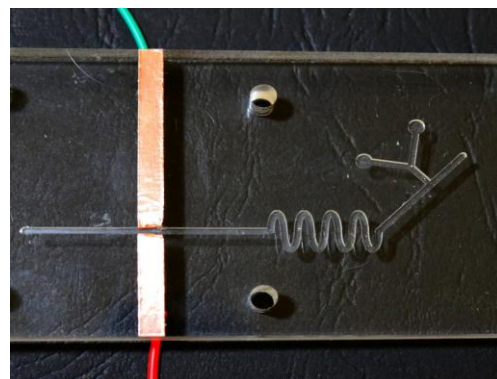
Egalement, lors de nos recherches, nous avons pensé à regarder le fond de nos canaux au microscope et on s'est très vite rendu compte qu'il n'était pas lisse. On voit très bien les traces laissées par la fraiseuse dans le PMMA et nous pensons que ses imperfections facilitent également le mélange de nos petites gouttes en créant des courants de convection à l'intérieur des gouttes lors de leur passage.

Pour finir, quand nous utilisons la cellule photographiée ci dessus, une partie de goutte peut se coincer lors des différentes mises en fonctionnement ou arrêts, au fond du coude (6). Ce « résidu » est très gênant par la suite, car des gouttes en passant par un coude peuvent être « accrochées » par ces résidus. Nous avons alors amélioré les coudes en arrondissant davantage les bords pour éviter ainsi ce désagrément.

## V. Comment mesurer la conductivité d'une goutte ?

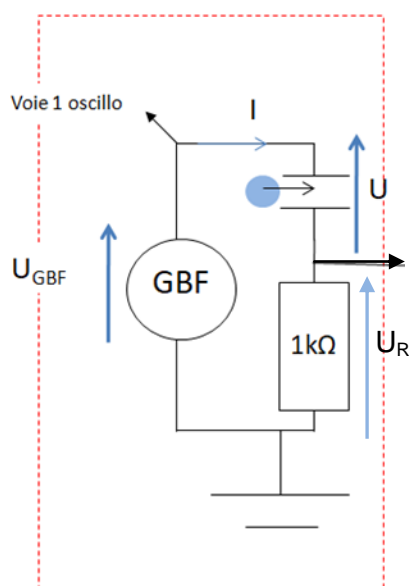
(de mars 2019 à juin 2019)

Au lycée, nous disposons d'une cellule conductimétrique constituée de deux plaques métalliques de surface  $1\text{cm}^2$  et séparées d'une distance de  $1\text{cm}$ . Elles sont reliées directement à un conductimètre qui affiche la valeur de la conductivité de la solution dans laquelle est plongée la sonde. Comment faire de même avec une goutte et intégrer dans nos canaux de section  $1\text{mm}$  par  $1\text{mm}$  des plaques conductrices d'électricité? Nous avons commencé par coller des petites bandes, de  $2\text{-}3\text{mm}$  de largeur, en papier d'aluminium sur les parois et sur le PMMA, mais nous avons du renoncer à ce papier, car très fragile et difficile à coller sans être déchiré. Nous avons alors recherché un papier fin, conducteur d'électricité, capable d'être collé, et nous avons trouvé du papier cuivre métallisé plus solide. Découpé en languettes, nous avons pu les coller sur le PMMA et tapisser les bords des canaux. La surface des deux électrodes est alors de  $2\text{-}3\text{mm}^2$ . Nous avons soudé sur les extrémités des languettes des fils de connexion. Notre première cellule était prête et nous nous sommes interrogés sur le moyen d'accéder à la valeur de la conductance d'une goutte. Pour cela, il nous faut connaître la tension  $U$  aux bornes de la cellule ainsi que l'intensité du courant  $I$  la traversant afin d'en déduire  $G=I/U$ .



Une cellule conductimétrique et les deux fils de connexion, installée avant la pose du PDMS

### CIRCUIT PRINCIPAL



Pour qu'un courant traverse nos gouttes lors de leur passage entre nos électrodes, il faut à l'aide d'un générateur créer une tension aux bornes de celles-ci. Nous avons vite abandonné le générateur de tension continu car nous avons vite constaté des réactions chimiques possibles au niveau des électrodes. M.Michel nous a conseillé d'utiliser un GBF afin d'inverser le sens du courant à intervalles de temps réguliers et « empêcher » ces réactions, ce que nous avons fait.

La tension  $U_{\text{GBF}}$  est fixée par le GBF et connue car nous pouvons la visualiser sur un oscilloscope ou une carte d'acquisition ; mais comment connaître l'intensité du courant traversant la cellule? Il faut en fait ajouter une résistance de valeur connue. Ainsi en visualisant la tension aux bornes de la résistance, on peut en déduire à chaque instant en utilisant la loi d'Ohm la valeur de l'intensité traversant la goutte et l'ensemble du circuit.

Pour déterminer  $U$ , il faut utiliser la loi d'additivité des tensions à savoir  $U_{\text{GBF}}=U+U_R$

La plupart du temps, la tension  $U_R$  est très faible devant  $U_{\text{GBF}}$  et on peut écrire que la tension aux bornes de la cellule est assimilable à la tension aux bornes du générateur :  $U \approx U_{\text{GBF}}$ . Par ailleurs pour connaître facilement la valeur du courant, il suffit de

choisir une valeur de  $R$  « facile » comme  $1\text{k}\Omega$ . Ainsi le courant traversant notre goutte est  $I=U_R/1000$  avec  $U_R$  en Volt et  $I$  en Ampère. Si on exprime  $I$  en mA alors  $I$  et  $U_R$  ont la même valeur numérique.

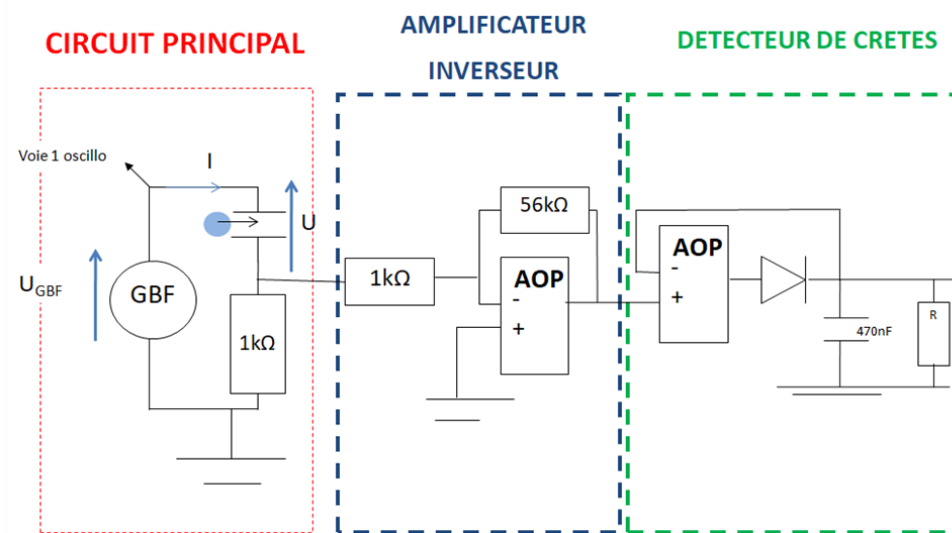
Pour déterminer la conductance  $G$ , il faut donc faire  $G$  (en mS)  $=U_{\text{GBF}}$  (en Volt)/(valeur de  $U$  en V)

Les valeurs de  $U_{\text{GBF}}$  et  $U$  étant sinusoïdales, quelles valeurs choisir pour déterminer  $G$  ?

Nous nous sommes concentrés sur les valeurs maximales des tensions et avons mis en place un détecteur de crête. Nous avons commencé par faire un montage amplificateur inverseur afin d'amplifier la tension assez faible aux bornes de la résistance ; puis un détecteur de crête comme décrit sur un site internet.

Au final nous avons une tension continue qui correspond à la tension maximale aux bornes de la résistance et donc à l'intensité maximale traversant la goutte (exprimé en mA).

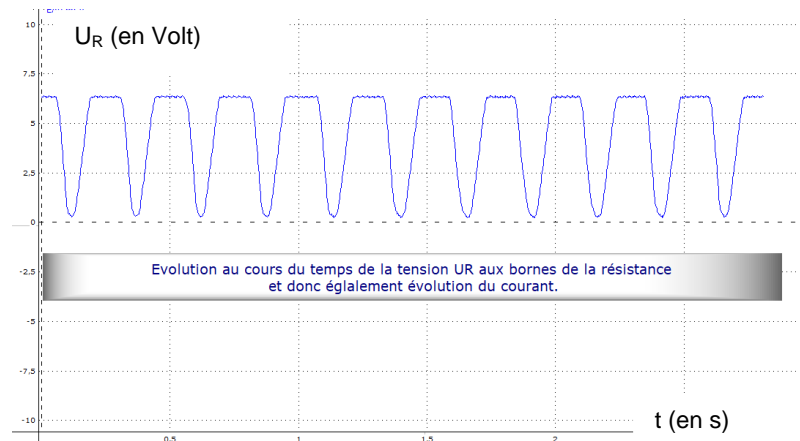
La valeur maximale  $U_{\max}$  de  $U$  ( $\approx U_{GBF}$ ) peut être déterminée à partir de la valeur affichée sur le GBF.



Nous avons recherché tous ces montages sur internet [5] et avons appris ainsi sur le tas l'électronique. Nous avons appris à brancher un AOP, à le connecter, à souder etc... Nous ne sommes pas des « pros » de l'électronique mais nous avons appris assez vite, motivés par notre objectif.

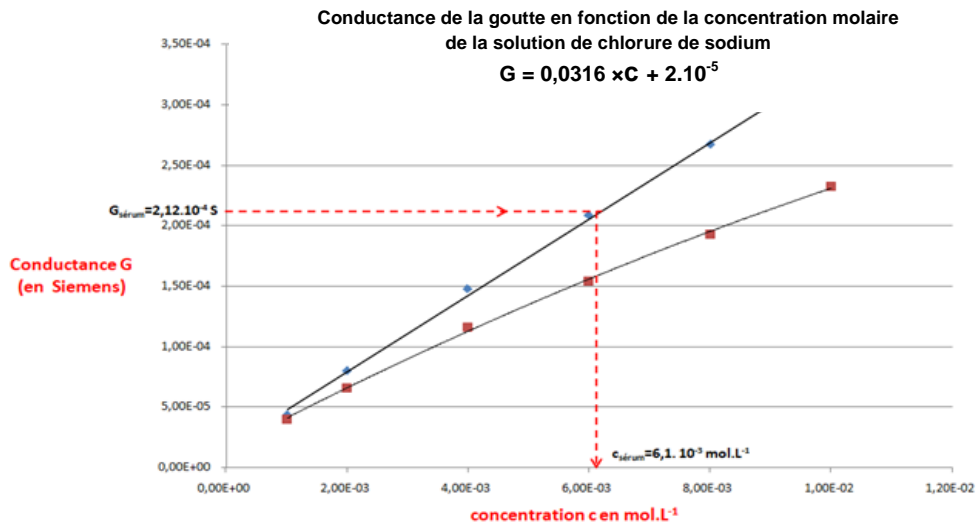
Nous sommes prêts à utiliser notre dispositif et donnons naissance à des gouttes salées et les faisons traverser dans notre cellule. Les vrais problèmes commencent ..!

Nos premiers enregistrements de  $U_R$  sont satisfaisants et nous observons le passage des gouttes salées, mais très rapidement des gouttes passent sans que notre millicellule semble détecter leur passage! ...et parfois la cellule ne détecte plus rien. Parfois également le signal est très bizarrement déformé. Nous avons alors douté de notre circuit électronique. Le plus simple pour le vérifier est de court-circuiter la cellule conductimétrique, ce que nous avons fait. Le circuit fonctionnait bien.



Nous avons regardé alors de plus près notre cellule à la grosse loupe et constaté que le papier en cuivre était légèrement décollé et qu'à chaque passage de goutte il s'agitait, occasionnant les déformations du signal. Il était en fait trop difficile de coller sur une petite surface l'extrémité d'une languette de 2-3 mm de large. Nous avons alors réussi à bricoler des électrodes bien maintenues et non collées sur les parois du canal en utilisant des « pattes » d'AOP, soudées sur des languettes elles mêmes collées sur du PMMA.

Les déformations se sont arrêtées mais les gouttes n'étaient toujours pas systématiquement détectées. Malgré tout, nous avons commencé des mesures en envoyant des gouttes de solutions de chlorure de sodium de différentes concentrations, obtenues par dissolution ou dilution. Pour chaque solution, nous avons déterminé la valeur de la conductance  $G$  des gouttes traversant la cellule. Nous avons obtenu la courbe suivante (points rouges) :



Nous avons été surpris de cette courbe car nous nous attendions à une droite linéaire ou affine avec une ordonnée à l'origine faible.

En effet d'après la relation de Kohlrausch, pour les solutions pas trop concentrées, la conductance doit s'exprimer ainsi:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{S}{\ell} \times (\lambda_{Na^+} + \lambda_{Cl^-}) \times c$$

$$G = K_{cell} \times \sigma$$

Où sont  $\lambda_{Na^+}$  et  $\lambda_{Cl^-}$  sont les conductivités molaires ioniques des ions  $Na^+$  et  $Cl^-$ . Leurs valeurs dépendent de la température et de la nature des ions.  $c$  est la concentration molaire de la solution. Le terme entouré en rouge ne dépend que de la solution, il s'agit de la conductivité  $\sigma$  de la solution.

$S$  est la surface des électrodes et  $\ell$  la distance qui les sépare. Le rapport  $\frac{S}{\ell}$ , notée  $K_{cell}$ , ne dépend donc que de la cellule. Il est appelé « constante de la cellule ». Elle peut s'exprimer en cm, tandis que la valeur de  $\sigma$  peut s'exprimer en  $S.cm^{-1}$ . Lorsqu'on utilise toujours la même cellule et les mêmes ions on doit s'attendre à une relation de proportionnalité entre  $G$  et  $c$ ...

$$G = \frac{1}{R} = \frac{S}{\ell} \times (\lambda_{Na^+} + \lambda_{Cl^-}) \times c$$

$$G = \text{constante} \times c$$

...mais ce n'est pas ce que nous obtenons !

C'est à ce stade que nous avons été reçus un après midi au laboratoire Moltech à l'Université d'Angers. Nous avons présenté à M.Sourisseau et M.Ségut notre dispositif et ils ont constaté nos problèmes : Il peut être déjà délicat de mesurer la conductivité d'une solution statique, à cause de la « pollution » des électrodes ; mais, concernant notre dispositif, notre solution dans la goutte est entourée d'huile et elle est en mouvement, ce qui complique forcément. Sans nous donner de solutions « miraculeuses », ils nous ont conseillés de rincer fréquemment nos électrodes avec une solution de soude, conseil que nous nous sommes empressés de suivre au retour dans notre lycée. Nous avons alors refait nos mesures et obtenu la courbe à l'allure attendue (points bleus). Sa pente correspond à  $K_{cell} \times (\lambda_{Na^+} + \lambda_{Cl^-})$  et est égale à  $0,0316 \text{ S.mol}^{-1}\text{L}$ . Comme les valeurs des conductivités molaires ioniques nous sont connues ( $\lambda_{Na^+} = 5,01.10^{-3} \text{ S.m}^2.\text{mol}^{-1}$  ;  $\lambda_{Cl^-} = 7,63.10^{-3} \text{ S.m}^2.\text{mol}^{-1}$  à  $20^\circ\text{C}$ ), nous pouvons en déduire une valeur de la constante de la cellule égale à 2,5 mm. Or cette valeur nous semble tout à fait conforme.

En effet, même s'il nous est difficile de déterminer la surface des électrodes, nous l'estimons à  $2-3 \text{ mm}^2$  et la distance qui les sépare est très proche de 1mm soit un rapport  $S/\ell$  compris entre 2 et 3mm.



Par ailleurs, nous pouvons utiliser cette courbe comme une courbe d'étalonnage. En « envoyant » des gouttes de sérum physiologique diluées 25 fois dans notre cellule, nous pouvons mesurer leur conductance et en déduire par lecture graphique la concentration en sel de ce sérum. Nous obtenons  $6,1 \cdot 10^{-3} \text{ mol/L}$  soit une concentration massique en sérum physiologique égal à  $8,9 \text{ g.L}^{-1}$  et un pourcentage massique égal à 0,89% ; valeur très proche de la valeur indiquée sur l'étiquette du flacon de ce sérum à savoir 0,9%..

Notre courbe est tout à fait conforme à ce qui est attendu, mais elle a été obtenue pour des gouttes qui se succèdent de concentration identique. Pour répondre à notre objectif évoqué au paragraphe 1, il nous faut créer et faire circuler les unes à la suite des autres une vingtaine de gouttes de mélange réactionnel (sel + nitrate d'argent) initialement différentes, les gouttes successives passant dans la cellule nous auraient donné la conductance de mélanges réactionnels différents, tout à fait ce qui est fait dans la manip classique ! Mais nous sommes confrontés à deux difficultés majeures :

- Il faut à la naissance de nos gouttes trouver une technique pour faire varier la quantité de l'un des deux réactifs.
- Il faut absolument que le dispositif soit très fiable. Aucune goutte ne doit échapper à la cellule !

Pendant des semaines, nous nous sommes efforcés de rendre le dispositif et la cellule plus fiable mais les « bugs » perdurent et les absences de signal se répètent. Toujours à la recherche d'une huile qui pourrait enfin nous « sauver », nous avons eu l'idée d'utiliser un autre fluide porteur: un fluide très peu visqueux, pas cher, non miscible dans l'eau.... Nous sommes dedans ; il s'agit de l'air. La cellule conductimétrique a fonctionné alors parfaitement...mais plus notre cellule millifluidique !! Déjà une fuite d'air est plus difficile à repérer qu'une fuite d'huile, mais cet inconvénient est mineur car lorsque les gouttes circulent, elles finissent très vite par s'accrocher par capillarité sur les parois de nos canaux, surtout au niveau des coudes, et là... c'est la catastrophe !!

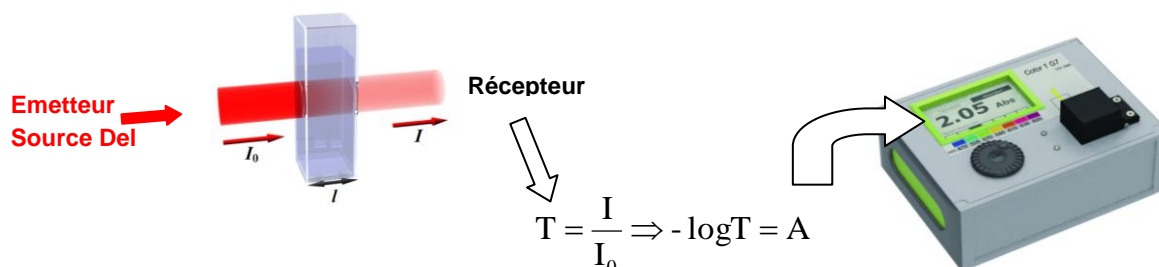
Au final, chaque problème, une fois résolu s'accompagnait de l'arrivée d'autres problèmes. Nous en avons oubliés sans doute certains. C'était véritablement une chaîne sans fin. Nous nous sommes entêtés jusqu'au mois de juin 2019, et même si nous réfléchissons de temps en temps à trouver une solution...nous avons pour l'instant renoncé à adapter à notre cellule millifluidique une millicellule conductimétrique. Nous avons donc demandé à M.Michel une autre expérience...

## VI. Un nouveau départ !

(de juin 2019 à hier)

### 1. Noter colorimètre au lycée

Au lycée, pour mesurer l'absorbance d'une solution colorée, nous utilisons le colorimètre ci-dessous. On peut tracer, grâce aux valeurs obtenues, des courbes d'étalonnage afin d'en déduire la valeur d'une concentration inconnue. Il permet également de suivre au cours du temps, l'évolution d'une réaction qui produit ou consomme une espèce colorée. Le principe d'un colorimètre peut être schématisé ainsi :



Ce colorimètre contient plusieurs diodes électroluminescentes de différentes longueurs d'ondes respectivement : 470nm, 525nm, 570nm, 590nm, 605nm, 626nm, 660nm. Nous pouvons donc choisir la longueur d'onde la plus adaptée. La lumière sélectionnée est alors envoyée au travers d'une petite cuve de 1 cm de largeur remplie de la solution colorée. Un capteur reçoit ensuite la lumière traversant la solution. Il est relié à un circuit électronique intégré et l'appareil nous donne ainsi directement la valeur l'absorbance de la solution, sous réserve de suivre le protocole suivant :

- Choisir la DEL la plus adaptée à l'espèce absorbante que l'on souhaite étudier.
- Remplir une cuve d'eau que l'on place dans le colorimètre, remettre le cache et faire le "0".
- Mettre la solution à étudier dans une cuve ; remettre le cache et relever la valeur de l'absorbance.

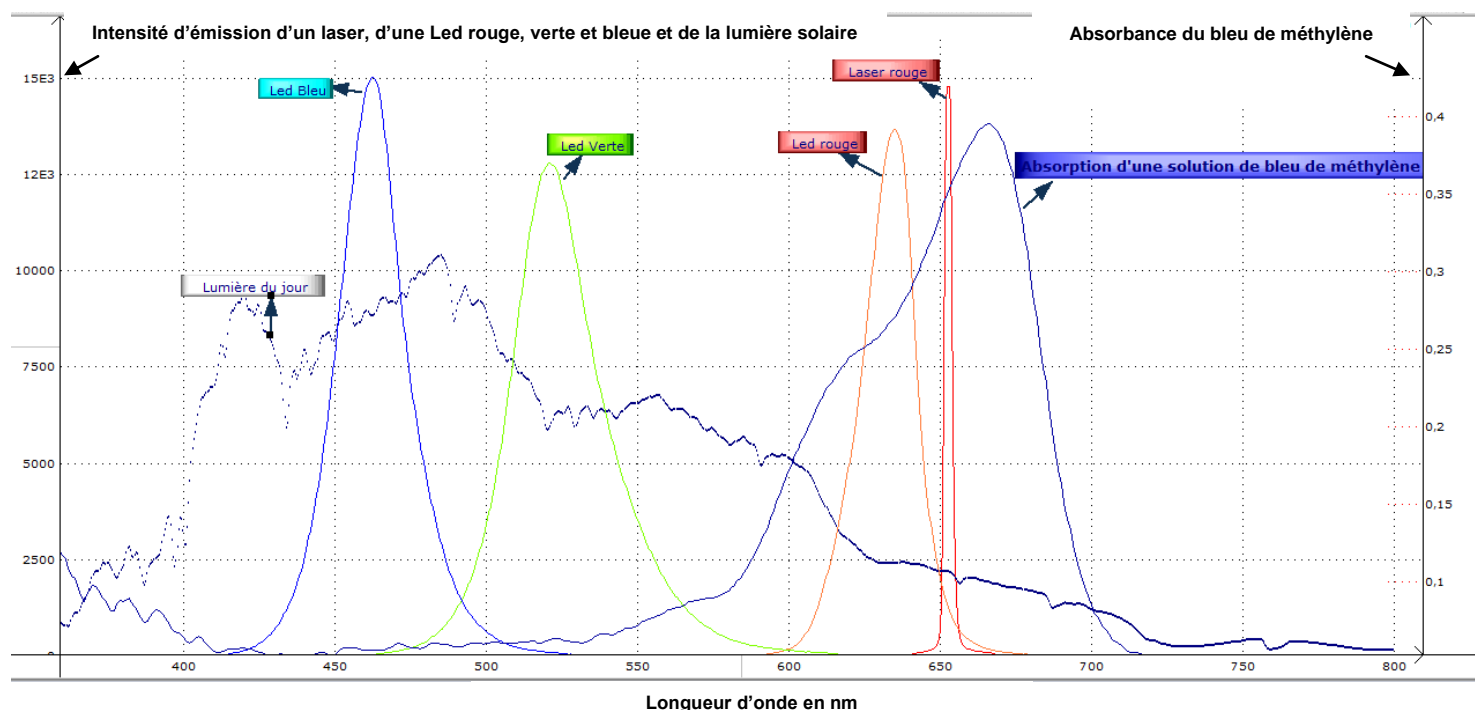
Pour l'adapter à notre dispositif, il nous faut désormais faire de même pour nos petites gouttes.

## 2. Quelle lumière et quel capteur ?

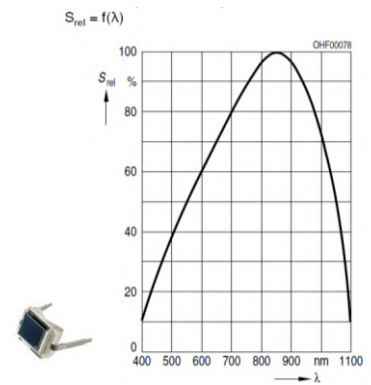
Profitant de la présence de colorant dans nos gouttes, nous voulons cette fois-ci avoir accès à leur absorbance plutôt qu'à leur conductivité. Comme nous le dit souvent M.Michel, que ce soit en cours, en TP ou à l'atelier, pour être précis dans une mesure, il faut mesurer grand ! Or, la loi de Beer-Lambert exprime l'absorbance de la solution par  $A = \epsilon \times \ell \times c$ , avec  $\epsilon$  pour le coefficient d'extinction molaire (en  $L.mol^{-1}.cm^{-1}$ ),  $\ell$  est la largeur de la solution traversée par la lumière (en cm) et  $c$  la concentration en colorant (en  $mol.L^{-1}$ ). Pour avoir la plus grande valeur de  $A$ , il faut que chacune des grandeurs ( $\epsilon$ ,  $\ell$  et  $c$ ) soit la plus grande possible. Pour la largeur de notre goutte, nous sommes limités à 1 mm de par la taille de nos canaux et donc de nos gouttes. Il nous est aussi difficile d'augmenter la concentration car cela peut nous poser problème comme nous le verrons après. Nous nous sommes donc concentrés sur la manière d'obtenir la valeur de  $\epsilon$  la plus grande possible.

Comme  $\epsilon$  dépend de la nature de la molécule colorante et de la longueur d'onde de la lumière reçue, il nous faut donc savoir quelle est la longueur d'onde la plus absorbée par notre espèce colorante. Ensuite, nous devons lui envoyer un maximum de radiations à cette longueur d'onde et s'assurer que le capteur y est sensible.

A l'aide du spectrophotomètre à fibre optique, on a tracé le spectre des "lumières" disponibles au lycée. On distingue les lumières polychromatiques (tube néon, lampe du rétroprojecteur, lampes halogènes) des lumières monochromatiques (ou considérées comme telles), comme les lasers ou les DEL.



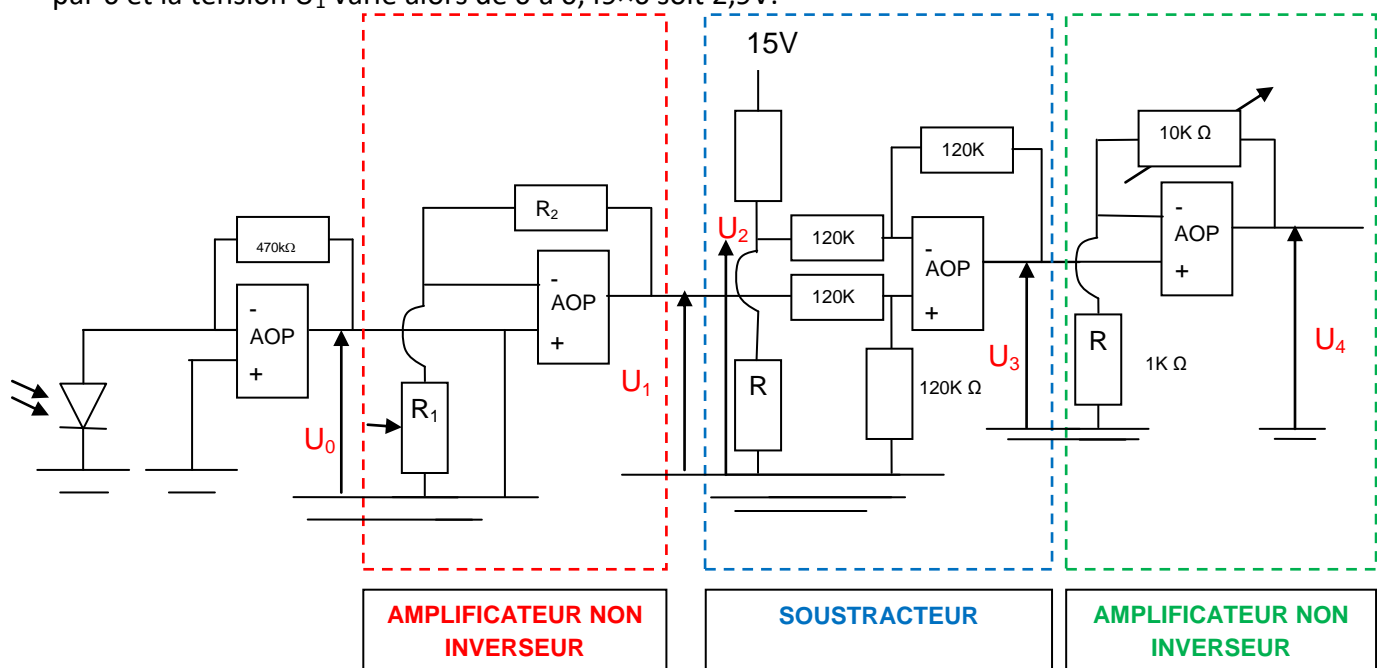
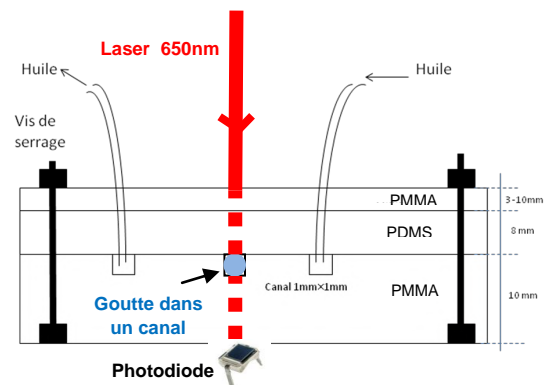
On dispose par ailleurs au lycée, comme capteur de lumière, des photodiodes ou des photorésistances. M.Michel nous a conseillés de mettre en oeuvre la photodiode, beaucoup plus réactive que la photorésistance. Par ailleurs, le courant que laisse passer la photodiode lorsqu'elle est éclairée est proportionnel à l'éclairement. Ce choix de capteur nous a bien arrangés, car le modèle de photodiode que nous avons au lycée est de bien plus petite surface sensible que notre photorésistance (environ 7mm<sup>2</sup> d'après la notice [6]). Comme le capteur doit être placé derrière nos petites gouttes, ce critère est très important. Au lycée, nous avons le modèle de photodiode BPW 34 pour laquelle nous avons la courbe de sensibilité grâce encore à sa notice [6]. Son maximum de sensibilité est atteint vers 850nm. Ainsi, si on étudie par exemple une solution colorée en bleu de méthylène (espèce très absorbante), dont nous avons tracé le spectre d'absorption, on constate que son maximum est atteint pour 664nm. La lumière la plus adaptée que nous possédons est un laser 650nm. Notre photodiode n'est pas parfaitement adaptée à cette longueur d'onde mais, d'après la courbe, elle sera sensible à environ 70% de sa valeur maximale, ce qui fera l'affaire.



La photodiode du lycée et sa courbe de sensibilité

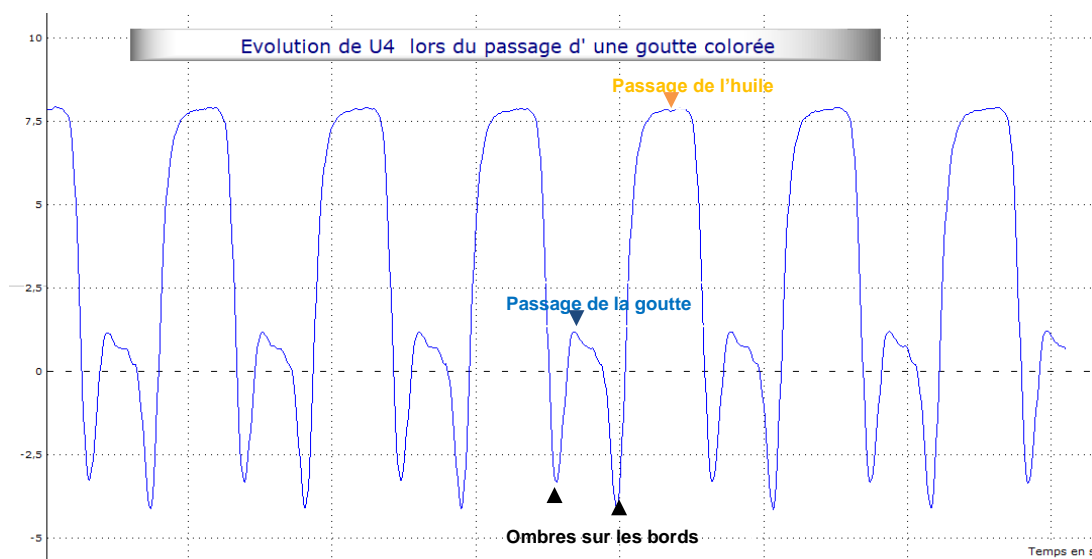
### 3- Mise en oeuvre du capteur...

Notre cellule est éclairée par le dessus. Sous cette dernière au niveau d'un canal, nous avons collé notre photodiode. Mais comment peut-on déterminer la valeur de l'absorbance avec notre photodiode ? Pour cela, nous avons repris nos recherches sur internet afin d'exploiter le signal de la photodiode. On apprend qu'elle fournit un courant proportionnel à l'éclairement si elle est correctement branchée. Nous avons trouvé un montage permettant de récupérer ce courant. La photodiode y est quasiment en court-circuit et le courant électrique fourni lorsqu'elle est éclairée passe à travers la résistance de  $R=470\text{ k}\Omega$ . La tension de sortie de l'amplificateur opérationnel est alors égale à " $R \times I$ ". Le courant dans une photodiode branchée comme la nôtre, est normalement de l'ordre d'un microampère et à la sortie de notre AOP, la tension est donc d'à peu près 0,47V au maximum. Pour que ce signal soit vraiment visible sur notre carte d'acquisition, qui peut visualiser des signaux entre -10 et +10V, on l'amplifie à l'aide d'un montage amplificateur non inverseur qui multiplie par  $(1+R_2/R_1)$  la valeur de  $U_0$ . Par exemple si  $R_2=5\text{ k}\Omega$  et  $R_1=1\text{ k}\Omega$  alors on amplifie la tension par 6 et la tension  $U_1$  varie alors de 0 à  $0,49 \times 6$  soit 2,9V.



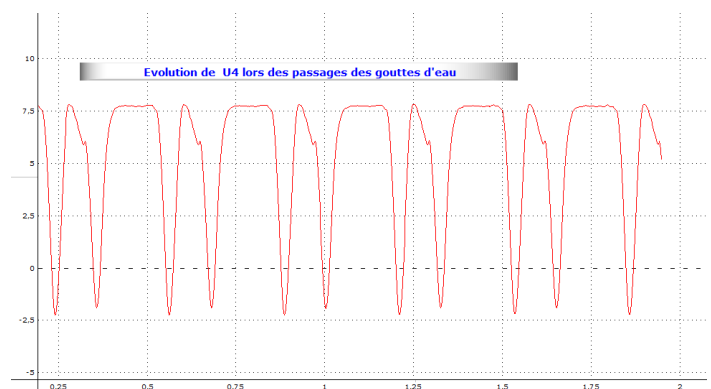
Sur la courbe EA1 qui correspond à  $U_1$ , on note bien le passage des gouttes. Pour faire de bonnes mesures, il nous faut mesurer des valeurs les plus grandes possibles. Or si on amplifie davantage, très vite le maximum de 10V autorisé par la carte d'acquisition est atteint. Notre idée est donc de « recentrer » la tension  $U_1$ , avant de l'amplifier de nouveau. Pour ce faire nous réalisons un montage AOP soustracteur dont la tension à la sortie est  $U_3 = U_1 - U_2$  avec  $U_2$  (EA2) une tension continue que l'on peut ajuster à notre guise. La courbe est alors recentrée et nous pouvons de nouveau l'amplifier à l'aide d'un dernier montage non inverseur.

Nous obtenons alors la tension  $U_4$  suivante :



Cette courbe est simple à interpréter. On repère facilement, le passage de l'huile et le passage de la goutte. Evidemment, lorsqu'on fait passer des gouttes d'eau, ces deux points sont au même niveau comme le montre l'enregistrement ci-contre :

On perçoit par ailleurs, les ombres de la goutte !



Mais les courbes précédentes n'ont pas été tracées sans peine...et nous avons rencontré bien des difficultés avant de réussir à les obtenir.

#### .....et les problèmes ne nous ont pas abandonnés !

Lors de nos premiers essais, nous obtenions bien un signal mais à notre grande surprise, lorsque nous faisons passer des gouttes d'eau, le niveau correspondant au passage était très inférieur à celui de l'huile contrairement à ce que nous attendions (courbe ci-dessus). Après avoir douté une nouvelle fois de

notre circuit électronique, nous avons regardé notre photodiode et nous sommes aperçus que sur celle-ci, c'était l'ombre des gouttes, bien davantage que de la lumière filtrée par celle-ci, qui défilait. Nous avons été surpris car dans notre idée, une goutte est transparente !...mais avons du admettre cette nouvelle difficulté. Comment la surmonter ? Nous avons essayé d'envoyer la lumière au plus près de la goutte à l'aide d'une fibre optique par exemple ou réduire avec du scotch noir la surface sensible de la photodiode et bien d'autres essais encore. Finalement notre difficulté était sans doute de ne pouvoir approcher la goutte, isolée qu'elle est entre des plaques de PDMS et PMMA. En cherchant la solution à notre problème et notamment en cherchant à comprendre comment éviter ce problème d' « ombres », nous avons utilisé des lentilles et avons eu alors l'idée d'intercaler une lentille convergente. Nous projetons l'image de la goutte à travers cette lentille sur un écran. Si l'image de la goutte est suffisamment grande, alors seuls les bords de la goutte présentent des « ombres » la partie centrale restant translucide. Nous avons commencé à utiliser un vidéoprojecteur en projetant l'image de nos gouttes à quelques mètres, avons placé sur l'écran vertical et sur l'image de nos gouttes défilantes notre photodiode et avons obtenu nos premières courbes satisfaisantes. Malgré tout, le dispositif était sensible aux vibrations, encombrant et il était difficile de faire le noir dans notre atelier ; notre photodiode était autant sensible à la tombée du jour qu'au passage de nos gouttes ! Le constat fait, nous avons réalisé un dispositif que nous aurons plaisir à présenter au jury des olympiades dans quelques jours et qui permet :

- De viser avec précision les gouttes avec un faisceau laser
- De permettre un noir complet sur la photodiode ou uniquement la lumière traversant la goutte.
- D'assurer une grande stabilité de l'ensemble.

Nous avons pu obtenir alors les courbes présentées précédemment qu'il reste à interpréter.

#### 4. Comment exploiter nos courbes ?

En fait dans notre chaîne, tout est proportionnel ! La tension  $U_0$  est proportionnelle à l'intensité du courant traversant la photodiode, elle-même proportionnelle à l'éclairement de la photodiode. L'absorbance de la goutte est définie par

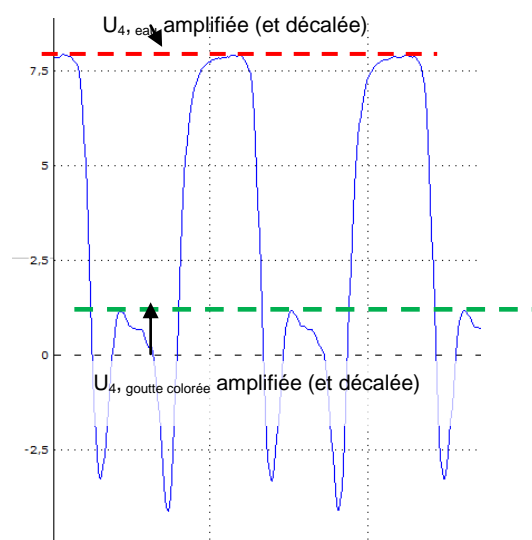
$A = -\log T = -\log \frac{I}{I_{\text{eau}}}$  où  $I_{\text{eau}}$  est l'intensité lumineuse reçue par

le capteur lorsque la goutte est uniquement constituée de solvant et  $I$  intensité lorsque la goutte contient une espèce

absorbante. On peut écrire  $A = -\log \frac{U_4}{U_{4\text{eau}}}$  (1). Il faut faire tout

de même attention car il faut que ces intensités soient mesurées quand seule la lumière ayant traversée la goutte arrive sur la photodiode. Il faut donc qu'en l'absence de lumière laser,  $U_1$  soit

nulle. Comme nous avons décalé la courbe vers le bas afin de pouvoir amplifier davantage et obtenir  $U_4$ , il faut tenir compte de ce décalage car la tension  $U_4$  en l'absence de lumière peut être négative ! Nous pouvons mesurer facilement sa valeur en coupant le laser et en enregistrant sur « latispro » la valeur  $U_{4\text{noir}}$ . Si celle-ci est inférieure à -10V, nous pouvons la mesurer à l'aide d'un voltmètre. Ensuite, il suffit de « remonter » les valeurs  $U_4$  et  $U_{4\text{eau}}$ . Par exemple si dans le noir on mesure -5V, nous réhaussons les valeurs de  $U_4$  et de  $U_{4\text{eau}}$  de la valeur 5V avant d'utiliser l'expression (1).



Notre premier calcul nous a conduits à une absorbance inattendue. En effet nous pouvons avoir une idée de la valeur de l'absorbance que nous souhaitons mesurer. D'après la loi de Beer Lambert

$$A = \epsilon \times \ell \times c$$

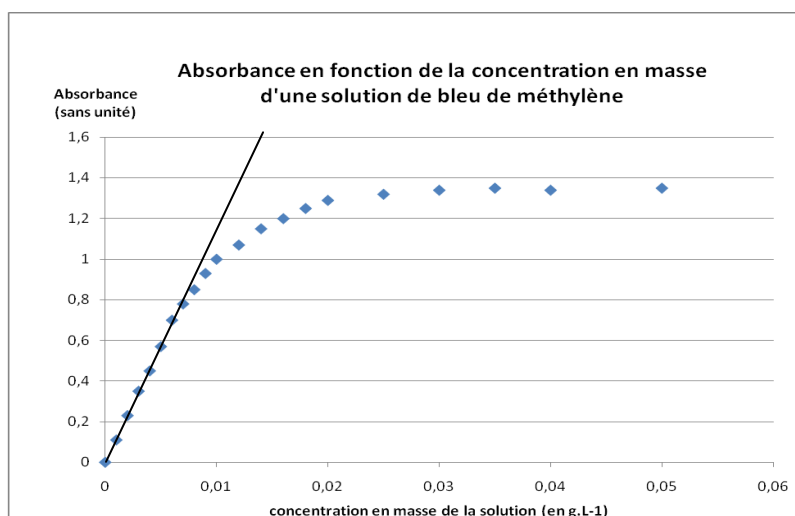


Nous pouvons connaître  $c$ , la largeur de la goutte est  $\ell = 1,0 \text{ mm}$  et  $\varepsilon$  peut être également évalué pour une longueur d'onde de  $650 \text{ nm}$  en utilisant le spectre d'absorption du bleu de méthylène que nous avons tracé (paragraphe VI.2). Cette courbe a été tracée pour une cuve de  $\ell = 1 \text{ cm}$ . La littérature nous donne la valeur maximale de  $\varepsilon$  de ce colorant pour une longueur d'onde de  $660 \text{ nm}$  égale à  $56400 \text{ mol}^{-1} \text{ L.cm}^{-1}$ . Pour une longueur d'onde correspondant à notre laser nous avons une absorbance moindre car la valeur de  $\varepsilon$  est moindre. Une simple exploitation de la courbe et un produit en croix nous permet de l'évaluer à  $49\,975 \text{ mol}^{-1} \text{ L.cm}^{-1}$ .

Avec cette valeur de  $\varepsilon$  ainsi déterminée, l'absorbance attendue pour une goutte de concentration en colorant égale à  $6,2 \cdot 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$  est égale à  $A_{\text{attendu}} = \varepsilon \times \ell \times c = 49\,975 \times 0,001 \times 6,2 \cdot 10^{-4} = 0,03$

Or, en exploitant notre courbe et en calculant l'absorbance à l'aide de l'expression (1), nous trouvons  $0,168$ , ce qui est bien inférieur à la valeur attendue. Nous avons longtemps recherché les causes de ce décalage mais les causes possibles d'erreurs nous paraissaient multiples : électronique, courbe mal interprétée. Nous avons fini par reprendre nos « bases » et refaire des mesures avec notre colorant et notre colorimètre « classique » du lycée. Nous avons pendant les dernières vacances préparées une vingtaine de solutions de bleu de méthylène par dissolution puis par dilution et mesurée l'absorbance de chacune d'entre elles dans une cuve de  $1 \text{ cm}$ .

Nos mesures rassemblées dans un tableur, nous avons pu tracer la courbe suivante.



Notre erreur s'est révélée à nous rapidement. La relation  $A = \varepsilon \times \ell \times c$  qui traduit une proportionnalité entre  $A$  et  $c$  n'est valable que pour des concentrations inférieures à  $8,0 \cdot 10^{-3} \text{ g.L}^{-1}$ . Nous utilisons des solutions trop concentrées pour lesquelles la loi de Beer Lambert n'est pas valide !

Nous venons de réaliser les mesures de l'Absorbance à l'aide de notre « colorimètre à goutte » et des concentrations inférieures à  $8,0 \cdot 10^{-3} \text{ g.L}^{-1}$ . Les courbes et les mesures sont bonnes ! ...mais il est temps de rendre ce mémoire.

« Notre colorimètre à goutte » semble efficace et fiable et surtout, contrairement à notre « conductimètre à goutte », aucune goutte ne lui échappe!...ce qui nous permet de voir plus loin et de poursuivre notre défi.

## Conclusion

Nous avons pu constater depuis plus d'un an maintenant, la difficulté et le temps nécessaire afin de résoudre les problèmes inattendus qui se posent à nous. Nous cherchons, essayons, ratons, recommençons... Mais nous avons toujours gardé espoir, car comme on peut le lire sur une petite pancarte fixée au mur de l'atelier par une ancienne élève : « Ce n'est pas parce que la situation est désespérée qu'il faut se laisser abattre ! ».

Nous pensons avoir découvert ce qu'était au quotidien la recherche scientifique. Ce projet nous apporte de nouvelles compétences et connaissances. Nous nous perfectionnons en physique, en chimie, découvrons l'électronique, l'électricité... Nous sommes très satisfaits d'avoir enfin mis au point un moyen de mesure fiable de l'absorbance d'une goutte, ce qui va nous permettre d'étudier une réaction chimique faisant intervenir une espèce colorante... à l'échelle d'une goutte!

Si nous parvenons à notre objectif, nous aurons créé une cellule peu chère, peu encombrante, permettant de réduire les quantités de réactifs utilisées lors d'une manipulation au lycée. Nous aurons ainsi apporté notre petite contribution afin de permettre aux sciences d'être plus respectueuses de l'environnement.

## Bibliographie-Webgraphie

- [1] [Mémoire des olympiades, que peut-nous apprendre une simple goutte?](#)
- [2] [Notice image J](#)
- [3] [Article de l'université de Toulouse](#)
- [4] "Ce que disent les fluides" Edition Belin-Pour la Science (pages 10 et 11)
- [5] [Wikipédia, montage avec amplificateur opérationnel](#)
- [6] [Notice de notre photodiode](#)
- [7] Nathan, Physique-Chimie, Terminale S, Tome 2, Annexe 1