

Concours C. Génial
25 mai 2013

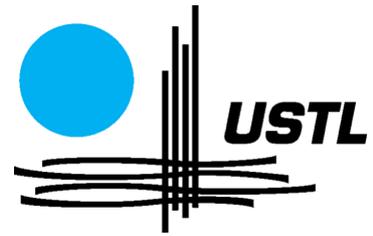
Palais de la Découverte

BESNIER Salomé, GOBERT Eugénie, LEROY Mélanie

Présentent



Partenaires



Résumé

Le but de notre travail est d'essayer d'étudier la formation d'un vortex dans un bécher lors d'une réaction chimique.

Nous nous sommes d'abord intéressées aux vortex libres créés dans une bouteille. Nous avons demandé à différentes personnes dans le monde de reproduire la même expérience.

Ensuite, nous avons réalisé des vortex dans des béchers. Différents moyens comme l'encre, des colorants, du poivre, de la poudre de lycopode, de l'huile ... nous ont permis d'étudier qualitativement la trajectoire de particules et de mesurer leurs vitesses.

Enfin, nous nous sommes intéressées à « l'effet Thelie », qui est la persistance d'une zone de non réaction lors d'un dosage quand on agite vivement à l'aide d'un agitateur magnétique.

Nous cherchons actuellement à modéliser nos observations et à les simuler informatiquement.

Introduction

Nous avons trouvé et adopté ce sujet alors que nous faisons un TP sur la dureté de l'eau. Nous avons alors remarqué qu'en accélérant la vitesse de rotation du turbulent, un tourbillon se formait. Nous avons décidé de travailler sur la provenance de ce dernier et la formation des vortex en général.

En effectuant des recherches, nous avons remarqué qu'une question revenait très souvent sous forme d'idée reçue:

«Lors de la vidange d'un lavabo, le sens de rotation de l'eau diffère-t-il selon l'hémisphère ?» Nous sommes parties de cette idée reçue pour nos recherches.

En faisant des expériences, nous sommes arrivées au dosage d'acide chlorhydrique par la soude. Notre professeur, nous a de suite parlé d'un élève qu'il avait eu, et qui avait découvert ce phénomène en classe : M. Gauthier Thelier (TS₂ promotion Pierre-Gilles de Gennes). Cette expérience nous a semblé fort intéressante ainsi que son aspect visuel. Ce dernier nous a poussées à faire de « l'effet Thelier » l'aboutissement de notre sujet.

I : Le sens de rotation du vortex

A : Pratique

1 : Réponse des 4 coins du monde

Tout d'abord, nous avons pris comme base les vortex libres pour mettre en évidence le sens de rotation d'un vortex. Nous voulions réfuter ou confirmer l'idée reçue disant que le sens de rotation d'une masse d'eau dans un évier change selon l'hémisphère. Pour cela, nous avons communiqué avec des personnes habitant dans différents endroits du monde pour leur demander de faire une expérience suivant un protocole fixe. Le but de l'expérience est de créer un vortex dans une bouteille suivant trois étapes.

L'installation est identique pour chaque étape, c'est à dire, une bouteille de 2L, retournée à la verticale le bouchon en bas, tout en étant bien stable. (Image 1)

Première étape : On laisse le système se stabiliser, puis on retire le bouchon de la bouteille sans induire de mouvement. Nos contacts ont réalisé plusieurs fois l'expérience. Et dans la majorité des cas, l'eau coule sans produire de vortex. De temps en temps, un mouvement rotatif s'esquissait sans toutefois pouvoir définir un sens de rotation vérifiable.

Deuxième étape : une fois l'eau bien stable, on donne un mouvement dans le sens horaire. L'expérience a été réitérée à plusieurs reprises. Dans la majorité des cas, un vortex se formait en tournant dans le sens horaire.

Dernière étape : une fois l'eau bien stable, on donne un mouvement dans le sens antihoraire. L'expérience a été refaite plusieurs fois. Dans la majorité des cas, un vortex se formait dans le sens antihoraire. (Image2)

Ces expériences réalisées aux quatre coins du monde nous ont montré que sans mouvement donné à l'eau, aucun vortex ne se formait librement dans une bouteille.

2 : Notre Réponse

Nous avons refait les expériences en faisant varier la taille de l'ouverture. Nous avons percé dix bouchons avec des diamètres de 2,5 mm à 20 mm. Nous voulions voir si la taille et l'ouverture influaient sur la formation des vortex. Plus le diamètre est large, plus le vortex se forme rapidement. Nous avons observé deux types de vortex. L'un se constituait d'une simple hélice, l'autre d'une double hélice.

La mécanique des fluides se caractérise par l'écoulement, pour le définir on utilise le nombre de Reynolds. Il représente le rapport entre la force d'inertie et les forces visqueuses.

$$Re = \frac{Ud}{\eta}$$

En fonction du nombre de Reynolds trouvé, on peut distinguer 3 régimes principaux. Il y a le régime de Stokes, le régime laminaire et le régime turbulent.

Nous avons calculé le nombre de Reynold dans le cas de notre bouteille de 2L au niveau du cylindre de la bouteille.

$$Re = \frac{0.01 \times 0.1}{10^{-6}} = 10^3$$

Celle-ci correspond à l'extrémité de la bouteille. $Re = \frac{0.001 \times 0.1}{10^{-6}} = 10^2$

Suite aux nombres de Reynolds trouvés dans notre bouteille, nous pouvons dire que le régime dans celle-ci est un régime transitoire. C'est pour cela qu'en induisant un mouvement avant de vider la bouteille, lors de sa vidange, on passe dans un régime turbulent ce qui permet d'observer un vortex.

Cependant, on ne peut pas démontrer le sens de rotation du vortex. Pour cela, nous avons cherché une explication théorique.

B : Théorie

Nous avons calculé les deux forces qui s'exercent sur notre bouteille. L'une est responsable de l'écoulement de l'eau, l'autre de sa rotation.

D'une part la force de Coriolis :

La force de Coriolis est une force agissant perpendiculairement à la direction du mouvement du fluide, et responsable de la rotation de ce dernier dans un référentiel en rotation uniforme.

Sa formule est la suivante : $\vec{F}_c = -2m\vec{\omega}\Lambda\vec{v}$

Dans notre cas, nous nous intéressons à un petit élément de fluide de 1 mL qui pèse 1,0 g. On considère la vitesse acquise par une chute verticale de 1 m, en supposant que toute cette vitesse est utile pour la force de Coriolis :

$$F_c = 2 \times 1,0 \cdot 10^{-3} \times 7,3 \cdot 10^{-5} \times 4 = 5,8 \cdot 10^{-7} N$$

D'autre part le Poids.

Le poids $P = mg$; agit dans le même sens et la même direction que le mouvement du fluide.

$$P = 1,0 \cdot 10^{-3} \times 9,81 = 9,81 \cdot 10^{-3} N$$

La force de Coriolis est 10^{-4} fois inférieure au poids, par conséquent la force de Coriolis est négligeable et n'a aucun impact dans notre expérience.

Donc contrairement à l'idée reçue, la force de Coriolis est trop faible pour pouvoir avoir une influence sur le sens de rotation de l'écoulement de l'eau de nos bouteilles.

Pour que la force ait une influence sur le sens de rotation, il faudrait s'intéresser à une masse d'eau importante avec une grande vitesse. Dans le siphon d'une baignoire, le sens de rotation de l'eau est donc dû à la géométrie de la baignoire ou à l'agitation de l'eau.

C : Influence du temps de repos

Nous avons voulu voir l'influence du temps de repos avant ouverture du bouchon. Nous avons procédé comme précédemment, avec les mêmes bouteilles et des bouchons percés d'un trou de 6 mm de diamètre. Nous avons fait varier le temps de repos de 30 s à 17 j.

Nous avons rassemblé nos résultats dans un graphique à l'échelle logarithmique. (Image 3)

En dessous d'une limite il est impossible d'avoir une eau assez calme pour pouvoir ne pas observer un vortex. Et il faut un certain temps pour que l'eau soit assez calme, pour pouvoir ne pas observer de vortex. Cependant il semble que l'on ne puisse pas garantir l'absence de vortex.

Ne pouvant créer de vortex libres dans une bouteille sans donner d'impulsion à l'eau, nous avons décidé de travailler dans un bécher avec notre masse d'eau mise en rotation grâce à un agitateur magnétique et un barreau aimanté.

II : Mouvements des fluides dans un bécher

A : Description du matériel.

Voici la liste de matériel utilisé (Images 4):

- Un bécher de 300 mL.
- Un agitateur magnétique réglable en vitesse avec un indicateur digital de vitesse de rotation en tr/min
- Trois turbulents de tailles différentes mais de même forme.

Pour pouvoir correctement analyser les vortex formés nous avons filmé nos expériences avec deux caméras, l'une face au bécher, l'autre au-dessus du bécher (Image 5). De plus le bécher était placé devant un fond bleu, entre deux règles graduées ; à la surface de l'eau nous avons mis de la poudre de lycopode ; enfin nous avons ajouté dans l'eau des grains de poivre pour visualiser le mouvement des particules sous l'eau.

B : Hauteur du vortex

Nous avons réalisé une multitude de vortex afin de faire une étude quantitative sur l'influence de différents paramètres.

Nous avons alors comparé les courbes de l'évolution de la hauteur du vortex en fonction du temps. (Image 6 et 7)

On peut constater que :

- Le vortex ne s'établit pas instantanément, il faut un certain temps (de 2 à 12 s) pour que la perturbation du barreau le provoque. Ce temps est d'autant plus court que le barreau est long et que la vitesse de rotation est grande.
- Le vortex se creuse progressivement avec une certaine instabilité
- La hauteur finale du vortex dépend de la taille du barreau et de sa vitesse.

Nous voulions savoir s'il existait un rapport entre la profondeur du vortex et la vitesse de rotation de barreau aimanté. Nous avons par hasard essayé la représentation log/log et par surprise nous avons obtenu des droites. Après la finale régionale, l'un des membres du jury, M. Georges WLODARCZAK, nous a fait parvenir un article (voir bibliographie) où l'on trouve les mêmes courbes. D'après ce que nous avons étudié en mathématiques ; la hauteur du vortex semble proportionnelle au carré de la vitesse angulaire, et d'après le travail de nos amis sur l'anagyre $E = \frac{1}{2} J\omega^2$, E correspond à l'énergie cinétique de rotation. Par conséquent nous en avons déduit que la profondeur du vortex semble proportionnelle à l'énergie fournie par le barreau aimanté. (Image 8)

La profondeur du vortex est-elle affectée par la hauteur d'eau dans le bécher ?

Pour cela nous avons effectué une série de photographies en faisant varier la hauteur du liquide dans le bécher, mais en gardant le même barreau et la même vitesse de rotation. La surface est marquée par de la poudre de lycopode.

Schéma des caractères étudiés (Image 9)

Il s'agit bien de la hauteur d'eau avec le vortex formé et de la hauteur du vortex.

Nos résultats sont récapitulés dans un graphique (Image 10)

Ces séries de mesures montrent que la profondeur du vortex évolue assez peu à 300 tr/min, il y a un léger amortissement quand la hauteur d'eau augmente.

A 600 tr/min, dans un premier temps l'amortissement est assez fort, puis cela évolue approximativement comme à 300 tr/min.

Pour une telle agitation (600 tr/min), au départ, on a un « effet Moïse », c'est-à-dire une ouverture du liquide par le barreau aimanté, celui-ci se retrouve presque à sec. L'énergie fournie par le barreau aimanté est plus grande que ce que l'eau peut compenser, ensuite c'est l'eau qui joue le rôle majeur. Enfin, c'est ce qu'il nous semble. (Image 11)

C : Les couches de couleurs

Pour voir comment se forme le vortex ainsi que le mouvement de l'eau dans un bécher, nous avons réalisé une expérience où l'on peut apercevoir différents niveaux grâce à 6 couches de couleurs de 50 mL chacune.

Pour effectuer cette expérience, nous avons pris la même base que pour l'expérience antérieure, c'est-à-dire, un bécher de 300 mL, un turbulent 39 mm de long et de 8,0 mm de diamètre ainsi qu'un agitateur magnétique. Pour pouvoir réaliser les différentes couches nous avons utilisé une ampoule à décanter et pour voir chaque niveau, nous avons utilisé différents colorants (colorants alimentaires et encre). Au terme de plusieurs expériences, nous nous sommes rendu compte que pour éviter que les couleurs ne se mélangent, il fallait définir le nombre de gouttes de chaque couleur associée à chaque niveau.

Pour commencer, nous voulions garder la même densité pour chaque couche en utilisant simplement de l'eau distillée. Mais les couches se mélangeaient, les couleurs n'étaient pas distinctes, par conséquent il était impossible de voir la formation du vortex et le mouvement de l'eau. Alors, nous avons décidé de changer légèrement la densité sans qu'il n'y ait de conséquence sur le volume.

Numéro de la couche	Volume d'eau distillée en mL	Volume d'eau salée à $5,0g.L^{-1}$, en mL	Couleur
6	50	0	Vert
5	40	10	Sans
4	30	20	Sans
3	20	30	Sans
2	10	40	Jaune
1	0	50	Jaune

Les couleurs répertoriées dans le tableau sont des colorants alimentaires.

Les couches N°2,3 et 4 sont volontairement non colorées pour pouvoir visualiser la propagation de la couleur par le bas ou par le haut. Les couches sont faites successivement de bas en haut. On fait la première en ayant la pipette pasteur qui touche le fond. Puis la seconde est faite en ayant la pipette pasteur juste au sommet de la couche précédente et ainsi de suite.

Voici une photo de l'installation de l'expérience : (Image 12)

Cette expérience nous a permis de voir, grâce aux couleurs et donc aux différentes couches, le mouvement de l'eau. Nous avons pu remarquer que les couches inférieures remontaient par les côtés du bécher puis revenaient par le centre au niveau inférieur initial. Ce cercle se produit indéfiniment tant que l'agitateur est en marche. La perturbation se propage de proche en proche par des cercles concentriques de haut en bas.

En réalisant l'expérience avec de l'encre nous avons obtenu les mêmes résultats, cependant la couleur de l'encre étant plus concentrée nous n'en avons mis qu'une goutte.

Voici un schéma qui résume le mouvement du liquide lors de la formation d'un vortex : (Image 13)

D : La couche d'huile

Nous avons également réalisé l'expérience des couches avec une couche d'huile.

L'huile reste au dessus du volume d'eau car sa masse volumique est plus faible. Nous avons pris le même matériel que l'expérience précédente à savoir un bécher 300 mL, le barreau aimanté de 39 mm et 8 mm de diamètre ainsi que l'agitateur magnétique réglé à 300 tr/min.

Nous avons réalisé l'expérience plusieurs fois, en changeant la proportion d'eau et d'huile mais en gardant toujours un volume global de 300 mL.

Voici un tableau récapitulatif des expériences réalisées (Images 14) :

Volume d'eau en mL	Volume d'huile en mL	Profondeur du vortex en cm
290	10	2
285	15	3
280	20	5
270	30	5,5
260	40	Vortex trop profond, formation d'une émulsion

Dès qu'on met un peu d'huile, l'effet du vortex semble très marqué. En fait la dépression semble être remplie d'huile.

Nous avons réalisé une expérience test avec uniquement 300 mL d'huile, et même au terme de plusieurs minutes d'agitation aucun vortex ne s'est formé. Nous pensons que l'huile est un liquide trop visqueux pour que la perturbation du barreau aimanté se propage.

Grâce à cette expérience, nous avons vu que lorsque nous mettons un liquide de densité plus faible au dessus de l'eau, on observe plus rapidement la formation d'un vortex. De plus, plus la proportion d'huile est importante par rapport à la proportion d'eau, plus le vortex formé est profond. Cependant nous n'avons pas réussi à expliquer pourquoi nous observons un tel phénomène.

E : Vitesses et trajectoires dans un vortex.

Pour connaître ce qui se passe dans notre bécher nous avons eu l'idée de suivre la trajectoire de particules en suspension dans le liquide, nous avons pour cela utilisé des grains de poivre.

Après avoir fait quelques dizaines de films de l'agitation de 300 mL d'eau par un barreau de 40 mm à 300 tr/min, nous les avons exploitées à l'aide du logiciel Génériss 5+ ; c'est un logiciel de pointage qui permet à partir d'une vidéo de calculer par exemple des vitesses de systèmes.

La première chose que nous obtenons est la trajectoire d'un grain de poivre $y = f(x)$. (Image 15)

Nous indiquons le début de la trajectoire. Celle-ci est hélicoïdale, la particule monte assez lentement (il faut 25 points pour une seconde) puis arrivée en haut elle semble se diriger vers le bas assez rapidement. Pour quantifier ces impressions de vitesse nous décidons de la calculer à l'aide de notre logiciel.

Menu affichage traitements de données puis dérivée (option lissage), on a les vitesses X' (V_x) et Y' (V_y) qui s'affichent.

Pour obtenir la vitesse du grain (dans le référentiel labo), on passe par le menu :

Affichage → Traitements de données → Calcul $v = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ v s'exprime en $m \cdot s^{-1}$. (Image 16)

On peut dire que la vitesse est globalement assez constante pendant la phase de montée du grain de poivre par l'extérieur et vaut aux alentours de $0,12 - 0,14 m \cdot s^{-1}$. Pendant le passage dans le canal du vortex elle vaut environ $0,25 m \cdot s^{-1}$.

II : Dosage d'acide chlorhydrique par la soude

A : Description du montage

Nous avons réalisé un dosage d'acide chlorhydrique par la soude. (Image 17)

Nous avons utilisé le même bécher et le même agitateur que pour les expériences précédentes.

Dans le bécher il y a de l'acide chlorhydrique (concentration 0.1mol.L^{-1}), un indicateur coloré (phénophtaléine) et de l'eau distillée. Dans la burette il y a de la soude (concentration 0.1mol.L^{-1})

B : Réalisation de l'expérience

Nous avons effectué notre dosage d'acide chlorhydrique par la soude. La réaction entre les ions oxonium (H_3O^+) et hydroxyde (HO^-) est rapide et totale. Cependant, en augmentant significativement la vitesse de rotation du barreau aimanté, on observe un phénomène étonnant. (Image 18)

Une limite définie à l'intérieur de laquelle la soude est comme prise au piège et dont elle s'échappe difficilement. La couleur rose- fuchsia indique que le pH est compris entre 8,2 et 12,0, la réaction totale et rapide n'a pas lieu. Cet état peut persister quelque dizaines de secondes après qu'une goutte de soude soit tombée dans le bécher avec l'agitateur en marche.

Notre explication est la suivante :

Au centre du bécher, c'est-à-dire dans la zone entre les pointillés, il y a création d'un vortex forcé. En effet le barreau aimanté en tournant ne provoque que l'agitation de la masse de solution directement au-dessus de lui. Cette zone semble se comporter comme une pointe liquide indépendante du reste.

Alors qu'à l'extérieur de la zone entre les pointillés, le vortex est libre. Il suit les mouvements mis en évidence dans la partie II. C, et n'est entraîné que par la rotation interne du fluide. Nous avons nommé cet effet « effet THELIER » du nom d'un ancien élève de notre lycée qui l'avait déjà remarqué et signalé.

Cependant lors de nos recherches pour tenter de savoir si cet effet avait déjà été remarqué et décrit par les scientifiques, nous avons conversé par e-mail avec M. Jean-Marc CHOMAZ, et nous avons rencontré M. Etienne GUYON. Il leur semble que cet effet se nomme « Colonnes de Taylor Proudman ». C'est un phénomène dû à l'effet de rotation de l'ensemble du fluide à l'extérieur du cœur du vortex. Le théorème explique que lorsqu'on ajoute un corps qui se déplace lentement dans un fluide qui tourne avec une vitesse angulaire élevée, la vitesse du fluide au cœur du vortex est la même suivant l'axe parallèle à l'axe de rotation. Cependant pour réellement pouvoir appliquer les Colonnes de Taylor-Proudman à notre « effet THELIER » il faut que le récipient soit aussi en mouvement ce qui n'est pas le cas dans nos expériences.

Conclusion

Grâce à toutes nos recherches et à nos nombreuses expériences, nous avons pu démontrer que la force de Coriolis, réputée pour induire un mouvement rotatif lors de la vidange d'un liquide, n'avait aucun effet sur des mouvements à notre échelle. En effet, lors de l'expérience des bouteilles, nous avons pu montrer que la formation d'un vortex ne peut avoir lieu que lorsque nous induisons un mouvement de rotation à l'eau.

Par conséquent, l'unique possibilité d'obtenir un vortex clairement maîtrisé est d'utiliser un agitateur magnétique et un barreau aimanté afin d'induire la rotation du fluide. Dès lors, nous avons pu observer les conditions de formation d'un vortex. Nous pouvons alors dire grâce aux expériences qu'il faut un certain temps au vortex pour qu'il s'amorce, se développe, puis se stabilise. La profondeur finale semble liée à la vitesse de rotation du barreau aimanté par une loi logarithmique, elle est assez peu affectée par la hauteur d'eau. Le mouvement mis en évidence par les particules de poivre est un mouvement de convection combiné à une rotation, ce qui donne une trajectoire hélicoïdale. Alors, dans un bécher, lorsqu'il y a un

vortex, les mouvements des fluides semblent aléatoires mais alors qu'ils sont décrits par une « géométrie fixe ».

Enfin, l'effet Thelie permet de montrer qu'il y a deux vortex distincts, l'un forcé par rotation du barreau et l'autre, libre, créé par les mouvements du vortex formé. Il y a alors peu d'échange entre ces deux zones. La réaction du dosage semble alors arrêtée.

Suite à notre exposé lors de la finale nationale des Olympiades de Physique, M. Etienne GUYON est venu en personne nous remercier, il nous a proposé l'effet des Colonnes de Taylor-Proudman pour expliquer notre « effet THELIER », et nous a conseillé de mettre en rotation le récipient ainsi que le fluide.

Nous tentons, actuellement, de réaliser l'expérience proposée par M. GUYON ; mais aussi de simuler informatiquement un vortex en utilisant les logiciels que nous recommandent nos partenaires scientifiques.

Bibliographie

Livres

- A. J. STEPANOFF, Pompes centrifuges et pompes hélices, théorie, tracé et application. Instruments pour l'industrie. Editions DUNOD, 1961
- D. PICARD, Mécaniques des fluides – BTS Industriels, Edition ELLIPSE, 2005
- E. GUYON, J. P. HULIN, L. PETIT, Ce que disent les fluides, Edition BELIN, 2011
- E. GUYON, J. P. HULIN, L. PETIT, Hydrodynamique Physique, EDP Sciences, 2001
- O. BURIDANT, F. DUCROCQ, G. GOMEZ, M. MARGARIT, A. MARGARIT ; J.L. MAURIN, G. NAGLIK, F. PLET, P. RYVES ; Travaux pratiques de physique chimie, de la seconde à la terminale ; Edition BORDAS, 2003

Articles

- G. HALASZ, B. GYURE, I.M. JANOSI, K.G. SZABO, T. TEL, Vortex flow generated by a magnetic stirrer, American Journal of Physics, Vol. 75, 1092-1098 (2007).
- ASCHER H. SHAPIRO, Bath-Tub Vortex, Nature 196, 1080 – 1081
- J. BOISSON, D. CEBRON, F. MOISY et J. P. CORTET, Un pendule de Foucault fluide, Reflets de la physique, No. 31 (octobre 2012), p. 22.

Remerciements

- ✚ Mme Christine RIGOLLET, Proviseure, lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.
- ✚ M. Mathieu VAAST, Proviseur Adjoint, Lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.
- ✚ M. Eric FOUCHOU-LAPEYRADE, agent comptable, lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer

- ✚ M. Olivier BURIDANT, professeur de Physique chimie, Lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.

- ✚ M. Didier SORET, professeur de Mathématiques, Lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.
- ✚ M. Patrick GALIOT, professeur de Physique chimie, Lycée Mariette, Boulogne-sur-Mer.
- ✚ Mme Christèle FLAMAND, professeure de Lettres modernes, Lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.
- ✚ Mme Bérengère SYLVAIN, professeure de Lettres modernes, Lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.
- ✚ Mme Marie Christine HECQUET, professeure d'anglais, Lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.

- ✚ M. Georges WLODARCZAK, Professeur, USTL, Lille 1, membre du jury régional, pour les articles qu'il nous a fait parvenir.

- ✚ M. Etienne GUYON, Laboratoire PMMH, ESPCI

- ✚ M. José BICO, Maître de conférences, ESPCI.
- ✚ M. Jean-Marc CHOMAZ, Laboratoire d'Hydrodynamique (LadHyX), Ecole Polytechnique.
- ✚ M. Gérard DUPUIS, Professeur de chimie, Lycée Faidherbe
- ✚ M. Kamil FADEL, responsable du département physique du Palais de la Découverte.
- ✚ M. Tariq MAHMUD, Program Director, University of Leeds, United Kingdom.
- ✚ M. Gregory CARTLAND GLOVER, Aston University, Birmingham, United Kingdom
- ✚ M. Imre M. JÁNOSI, Von Kármán Laboratory, Eötvös University, Budapest, Hungary
- ✚ M. Tamas TEL, Von Kármán Laboratory, Eötvös University, Budapest, Hungary
Pour leurs nombreuses réponses aux questions que nous nous posions par mails.

- ✚ Mme Emilie SANSSOUCY, Licence de Physique Chimie, Calais.
- ✚ M. Gaéтан TOURSEL, Licence de Physique Chimie, Calais.
- ✚ M. Gauthier THELIER, ILIS, Lille2

- ✚ Mme Patricia CAROEN, Sylvie DELETOILLE, Betty HENGUELLE et Véronique PRUVOT et M. Gaél DANIEL, Romain LAMARRE et Bruno HERMAND, personnels de laboratoire, pour leur compréhension, leur aide et leur patience.

- ✚ MM. Mathieu ROHART, Fabien VIOLIER, service informatique, lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer. Pour leurs précieux conseils.

- ✚ A tous les personnels du lycée qui ont fait ce qu'ils pouvaient pour nous aider dans notre travail.

- ✚ Aux anciens élèves d'Olympiades de Physique, pour leur participation aux expériences dans le monde.

- ✚ A nos camarades des Olympiades de physique et notre classe de terminale S₂ pour leur soutien.
- ✚ A nos parents pour le travail de relecture et leur patience.
- ✚ Merci aussi à tous ceux qui nous ont aidés et que nous avons oublié de citer.
- ✚ Merci à tous ceux qui ont eu la patience de nous écouter.

Image 1



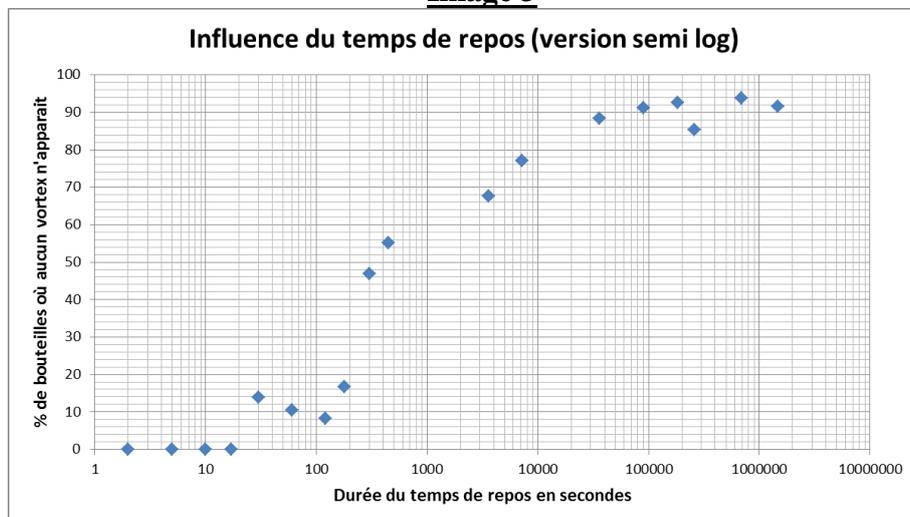
Notre montage à Paris lors de la finale des Olympiades

Image 2



Vortex dans une bouteille

Image 3



Images 4



← L'agitateur et le bécher utilisés



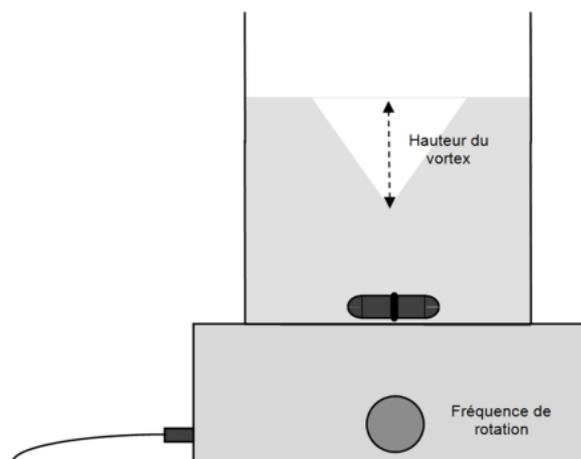
Les différents barreaux utilisés

Image 5



Mélanie préparant un film dans un bécher

Image 6



Schéma du dispositif utilisé

Image 7

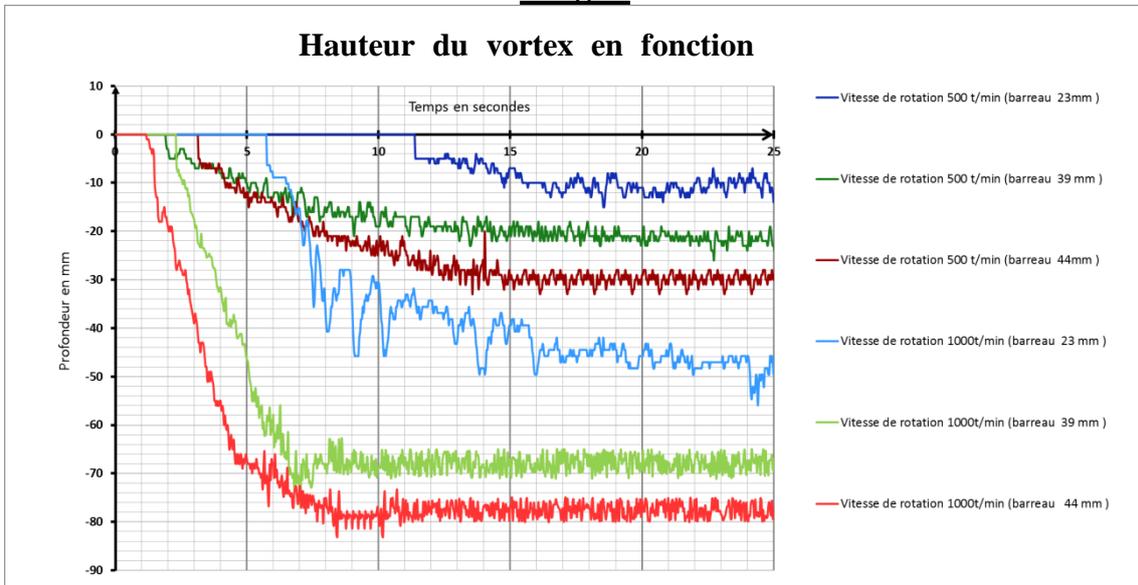


Image 8

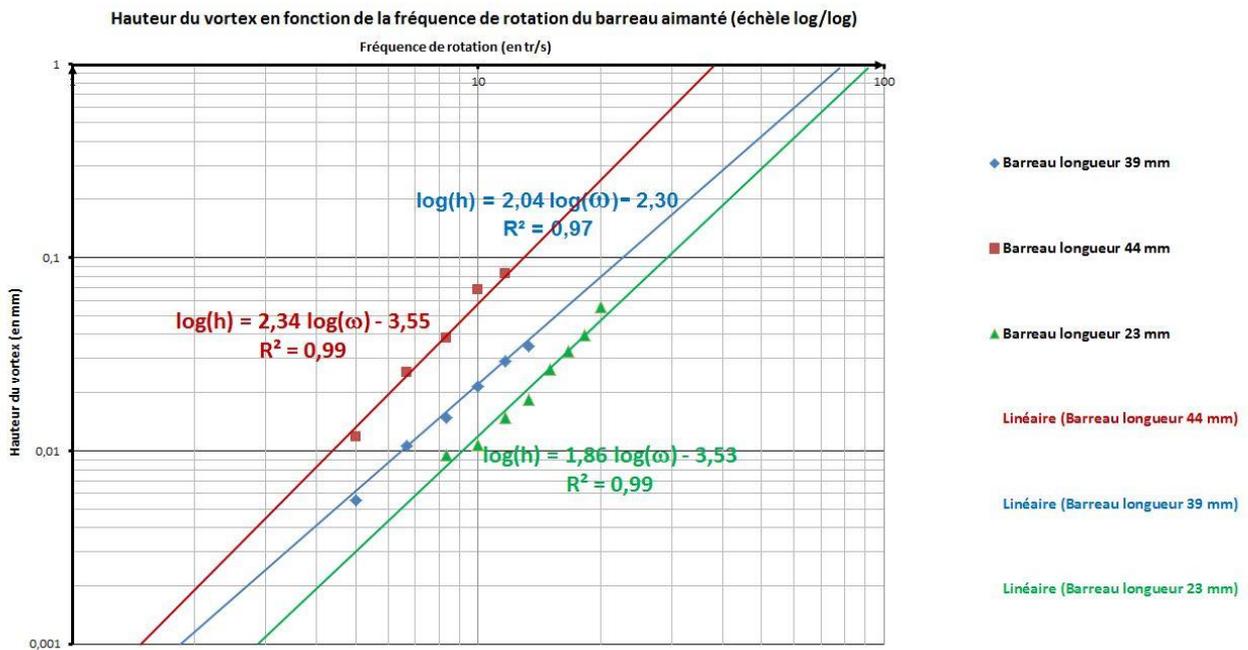
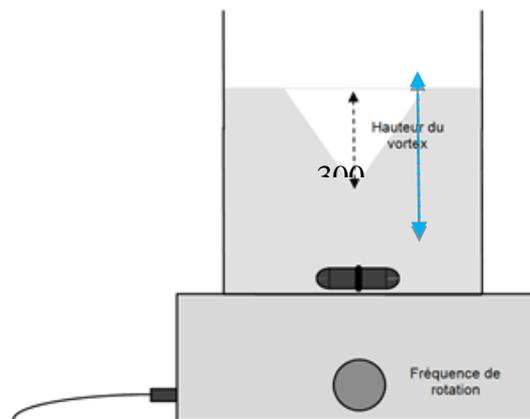


Image 9



Hauteur du vortex en fonction de la hauteur d'eau dans le bécher

Image 10

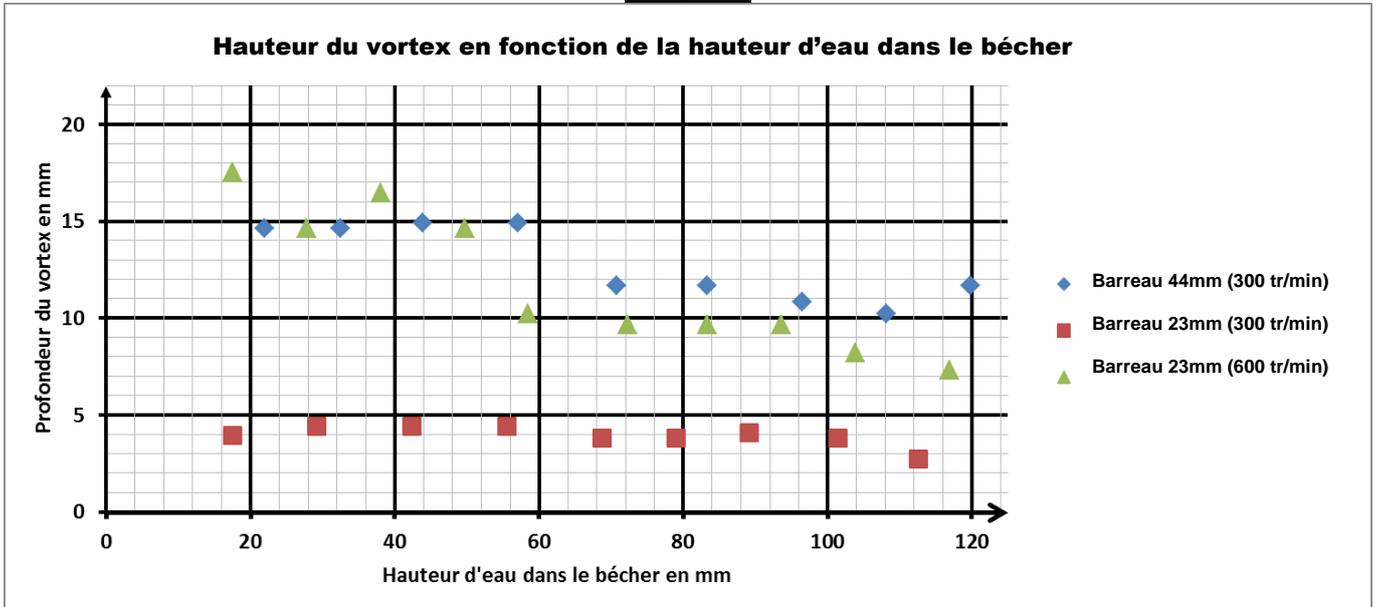
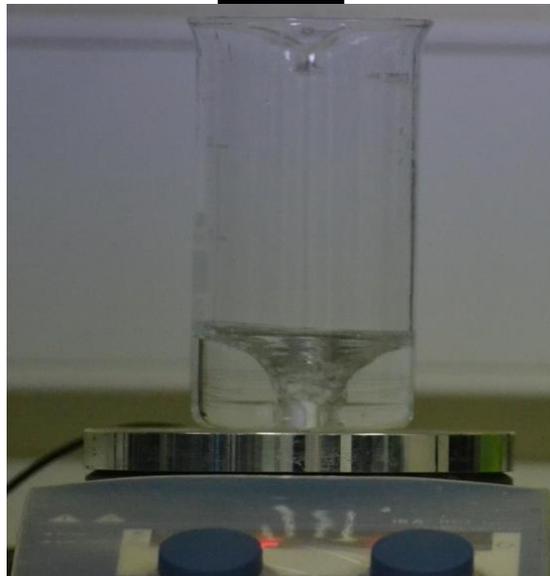
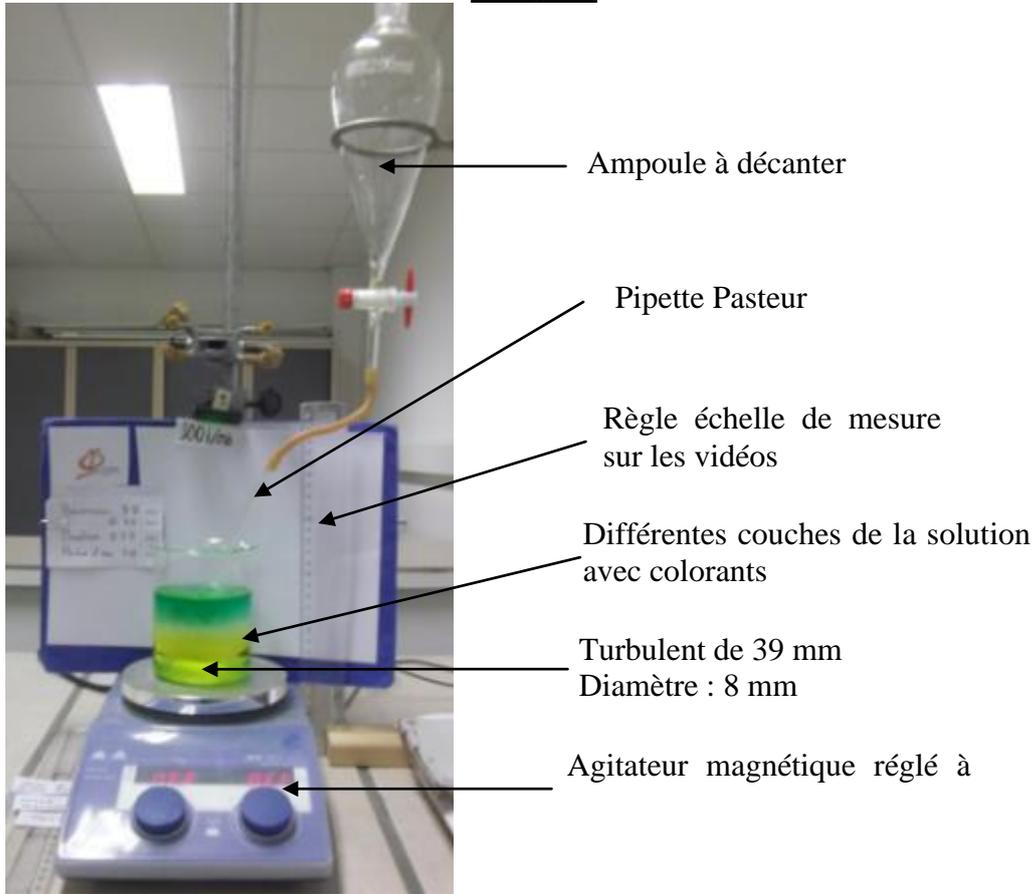


Image 11



Un exemple d'effet « Moïse »

Image 12



Notre montage

Image 13

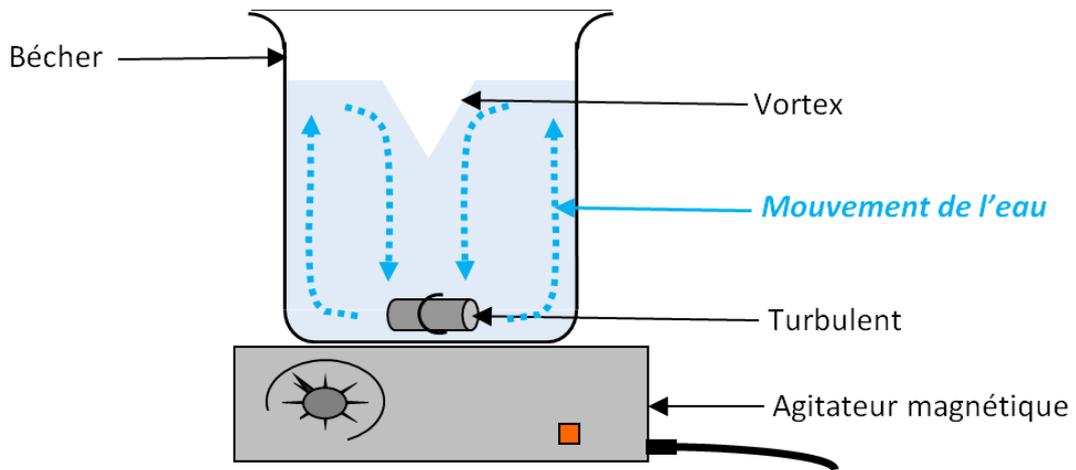


Schéma représentant le mouvement de l'eau lors de la formation d'un vortex

Images 14

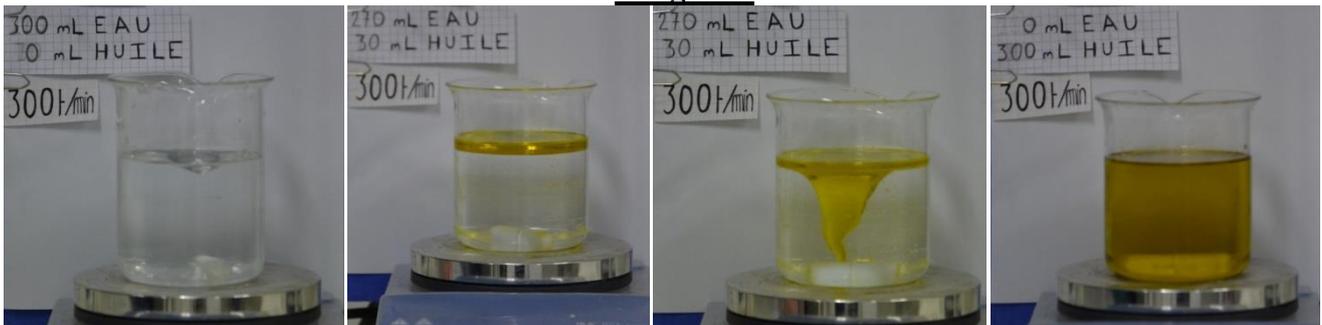


Image 15

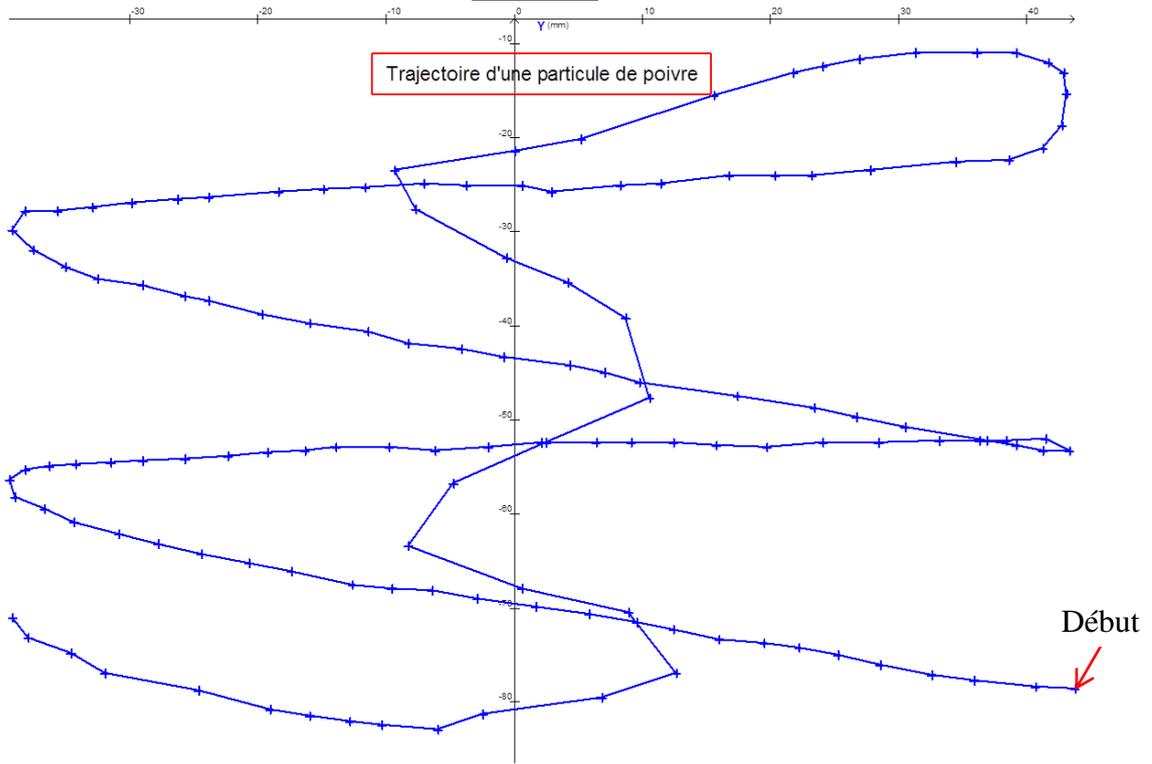


Image 16

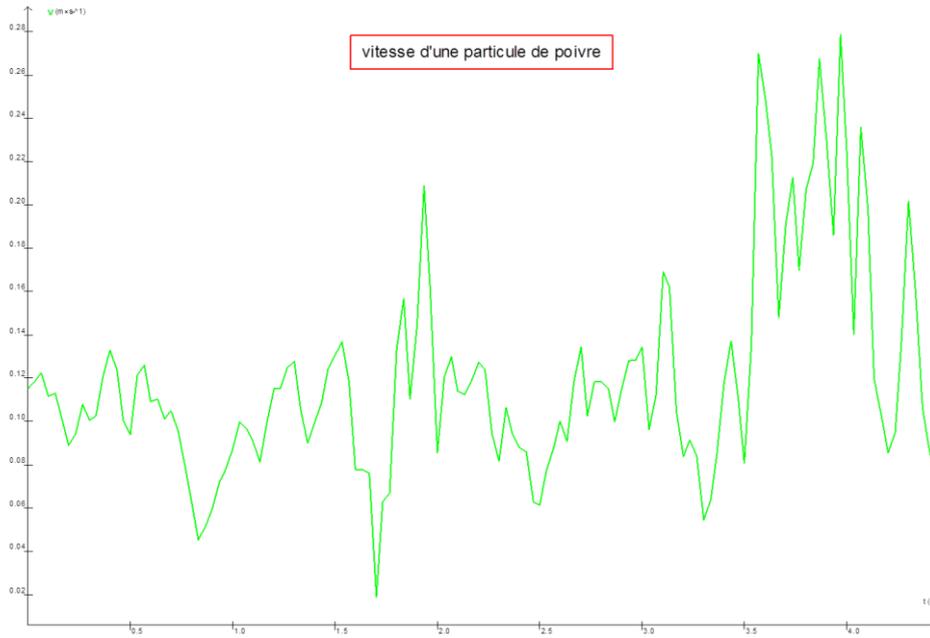
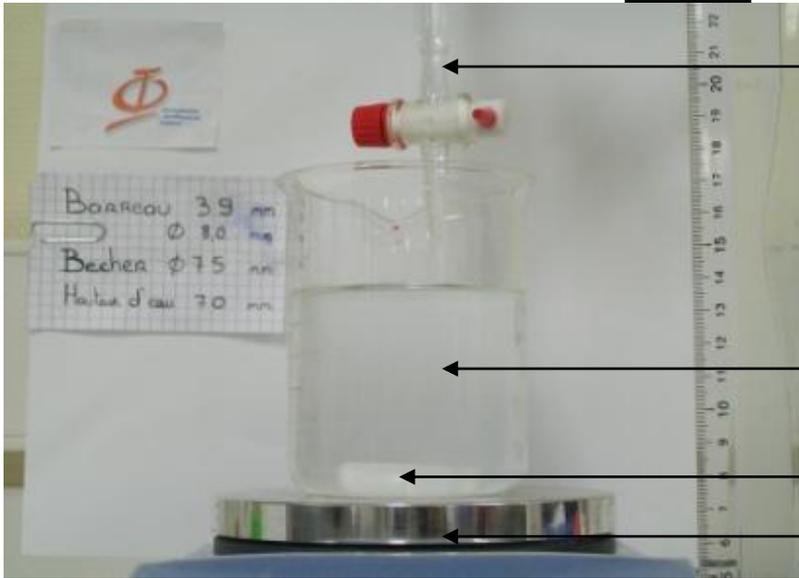


Image 17



Burette remplie de soude à $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$

Bécher rempli d'acide chlorhydrique à $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$, d'eau distillée et de quelques

Barreau aimanté

Agitateur magnétique

Image 18

