

Chute d'une bille dans un fluide

Réf. CHUTFLU2

1. COMPOSITION

L'ensemble référence CHUTFLU2 est livré avec les éléments ci-après :

- 1 éprouvette de longueur 550 mm et Ø 50 mm monté sur support sérigraphié ;
- 1 trappe circulaire avec 5 vis de fixation et un joint torique ;
- 3 billes avec noyaux métalliques de diamètre 20 mm, de couleurs et de densités différentes
- 1 aimant néodyme à champ magnétique directif pour retenir la bille sélectionnée.

Le dispositif est équipé de patins antidérapants aux deux extrémités lui conférant une grande stabilité sur tous supports.

Le dispositif doit être complété par 1 litre de fluide visqueux. Nous conseillons l'huile de vaseline de densité 0,87 (réf. 141003.1L), ce qui permet d'avoir des rapports de densité bille/fluide d'environ 3, 5 et 9.

2. DESCRIPTION ET PRINCIPE

Cet ensemble « Chute d'une bille dans un fluide » a été conçu spécialement pour l'étude d'une « Chute verticale avec frottements ».

La maquette consiste en une éprouvette de diamètre 50 mm environ et de longueur 550 mm fixée sur un support gradué en cm. L'une des 2 extrémités dispose d'une trappe d'accès permettant de remplir l'éprouvette d'un liquide plus ou moins visqueux (eau, huile, glycérol dilué ou non avec de l'eau, etc) et d'introduire une bille dont on va étudier la chute verticale avec frottement dans le dit fluide.

L'ensemble est livré sans fluide avec 3 billes métalliques de diamètre 20 mm et un néodyme pour le maintien de la bille sélectionnée.

En retournant l'éprouvette tout en maintenant la bille à l'aide de l'aimant, on peut ainsi lâcher la bille sans vitesse initiale, puis relever manuellement ou par vidéo les positions de la bille au cours de sa chute en fonction du temps. A l'aide d'un traitement informatique des données, on étudie ensuite l'évolution de la vitesse au cours du temps.

L'avantage de ce dispositif réside dans le fait que les paramètres ne sont pas figés : en effet, il est possible de changer à souhait le fluide et/ou les billes afin d'étudier de nouveaux régimes de chute. Toutefois, afin de faciliter le déroulement du TP, il est recommandé de préparer les éprouvettes avant la séance et de les laisser fermées durant toute la séance.

Le support avec échelle sérigraphiée présente plusieurs avantages :

- Possibilité de réaliser l'expérience sans avoir recours à la vidéo, en relevant les temps pour plusieurs positions avec un chronomètre numérique (pour les liquides dont la viscosité le permet).
- Le fond blanc permet d'avoir une vidéo nette, sans être gêné par un quelconque objet ou personne se trouvant derrière l'éprouvette.
- Les graduations inversées des 2 côtés permettent de lire repérer aisément la position de la bille ou d'étalonner précisément la vidéo (échelle).
- Enfin, il est aisé de stocker le dispositif à plat, sans risque de casse.

3. MISE EN ŒUVRE DU MATERIEL

Afin de garantir une parfaite étanchéité et de permettre aux enseignants d'interdire aux élèves l'ouverture de l'éprouvette s'ils le souhaitent, il a été choisi un mode d'ouverture / fermeture avec un outil. Il est donc indispensable de se munir d'un tournevis cruciforme pour ouvrir et fermer l'éprouvette.

a. Matériel complémentaire :

- 1 tournevis cruciforme
- Liquide plus ou moins visqueux : nous conseillons l'huile de vaseline (réf. 141003.1L).
- 1 chiffon ou papier essuie-tout pour éponger le trop plein lors du remplissage.

b. Préparation avant le TP

- Ouvrir la trappe en dévissant les 5 vis de blocage ;
- Verser délicatement le liquide à raz bord (voire même en excès) ; attention, dans le cas d'un liquide très visqueux tel que le glycérol, il faut verser lentement le liquide afin de limiter le nombre de bulles d'air.
- Insérer les 3 billes de couleurs et de densités différentes.
- Refermer la trappe en essuyant le fluide en surplus ; visser fermement de manière à bien plaquer le joint torique afin de garantir une parfaite étanchéité.
- Dans le cas où des microbulles d'air se seraient formées, réaliser plusieurs aller et retour des 3 billes et laisser reposer quelques heures l'ensemble. Ouvrir à nouveau et compléter avec du liquide.

c. Nettoyage

Si l'on souhaite changer le liquide, procéder en sens inverse. Rincer à l'aide d'eau chaude et de liquide vaisselle. N'utilisez surtout pas de produits corrosifs ou trop agressifs, ceci risquerait d'endommager le plastique et/ou la colle. Laisser sécher avant de remplir à nouveau de liquide.

4. SERVICE APRES-VENTE

En cas de perte de vis ou de détérioration du joint, contacter notre service après vente :

SORDALAB
15, Avenue des Grenots
91150 ETAMPES
France
Tel : +33 (0)1.69.92.26.72
Fax : +33 (0)1.69.92.26.74

5. APPROCHE THEORIQUE

a. Bilan des forces

i. Poussée d'Archimède

Un solide immergé dans un liquide subit de la part de celui-ci une force \vec{P}_A appelée « poussée d'Archimède » dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Direction : verticale,
- Sens : dirigée vers le haut (inverse du poids),
- Intensité : égale à l'intensité du poids du fluide déplacé (pris par le corps immergé).

Son expression est donnée par la relation :

$$\vec{P}_A = -\rho_f \times V \times g$$

avec :

- \vec{P}_A : la poussée d'Archimède en N, dirigée en sens inverse du poids
- ρ_f : masse volumique du fluide en kg.m^{-3}
- V : volume de la partie immergée du corps en m^3
- g : accélération de pesanteur en m.s^{-2} : $9,81 \text{ m.s}^{-2}$

Dans le cas présent, le corps est la bille est elle est totalement immergée. On a donc :

$$V = V_b = \frac{4\pi}{3} R_b^3 \quad \text{avec } R_b \text{ le rayon de la bille}$$

D'où l'expression de la Poussée d'Archimède :

$$\vec{P}_A = -\rho_f \times V_b \times g$$

ii. Poids de la bille

L'expression du poids de la bille est donnée par :

$$\vec{P} = -\rho_b \times V_b \times g$$

iii. Force de frottement

Une bille chutant dans un fluide subit une force de frottement visqueux dite force de Stokes s'opposant au mouvement de la bille et dont l'intensité évolue avec la vitesse de la bille.

Selon la viscosité du fluide en question, l'intensité de cette force notée \vec{F}_s suit l'un des 2 modèles suivants dépendant tous deux du vecteur vitesse \vec{V} de la bille :

- $\vec{F}_s = k \cdot \vec{V}$ l'intensité de la force évolue proportionnellement à la vitesse de la bille ;
- $\vec{F}_s = k \cdot V^2 \cdot \frac{\vec{V}}{V}$ l'intensité de la force évolue proportionnellement au carré de la vitesse de la bille ;

Le facteur k est une constante qui dépend de la viscosité η du fluide et du rayon R_b de la bille :

$$k = -6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R_b$$

b. Projection sur les axes et mise en équation

On applique ensuite la 2^{nde} loi de Newton, dite aussi principe fondamental de la dynamique :

$$\sum \vec{F} = m \cdot \gamma = m \cdot \frac{d\vec{V}}{dt}$$

Ce qui donne, une fois projeté sur les axes, comme illustré dans le schéma ci-contre :

$$\vec{P}_A = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho_f \times V_b \times g \end{pmatrix} \quad \vec{P} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho_b \times V_b \times g \end{pmatrix}$$

$$\vec{F}_S = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -k \cdot V \quad \text{ou} \quad -k \cdot V^2 \end{pmatrix} \quad m\vec{\gamma} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho_b \times V_b \times \frac{dV}{dt} \end{pmatrix}$$

L'expression de la vitesse de la bille au cours de sa chute est alors la solution d'une équation différentielle. Selon le modèle de force de frottement appliqué, on obtient :

- Cas des forces de Stokes proportionnelle à la vitesse :

$$\frac{dV}{dt} + \frac{k}{\rho_b \cdot V_b} V = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_b}\right) g$$
- Cas des forces de Stokes proportionnelle au carré vitesse :

$$\frac{dV}{dt} + \frac{k}{\rho_b \cdot V_b} V^2 = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_b}\right) g$$

Pour simplifier les relations, on pose : $\alpha = \frac{\rho_f}{\rho_b}$ et $\tau = \frac{\rho_b \cdot V_b}{k}$

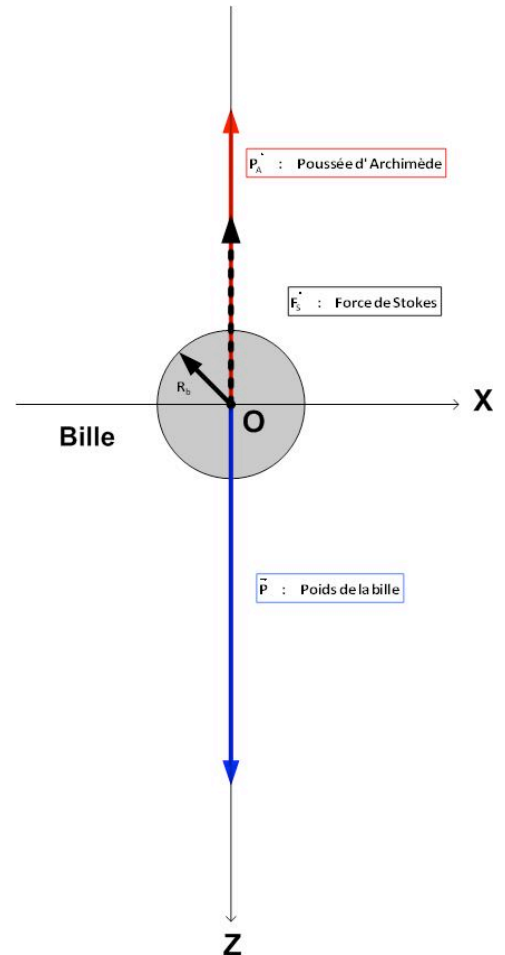
Les équations différentielles deviennent alors :

- Cas des forces de Stokes proportionnelle à la vitesse :

$$\frac{dV}{dt} + \frac{V}{\tau} = g \cdot (1 - \alpha)$$

- Cas des forces de Stokes proportionnelle au carré vitesse :

$$\frac{dV}{dt} + \frac{V^2}{\tau} = g \cdot (1 - \alpha)$$



c. Résolution des équations différentielles

i. Cas des forces de frottement proportionnelles à la vitesse

On est dans le cas de figure où l'équation différentielle a l'expression suivante :

$$\frac{dV}{dt} + \frac{V}{\tau} = g \cdot (1 - \alpha)$$

La solution générale $V(t)$ est la somme de la solution sans second membre (SSM) et de la solution particulière avec second membre (SPASM).

1. Solution homogène de l'équation différentielle sans second membre

$$\frac{dV}{dt} + \frac{V}{\tau} = 0 \Rightarrow \frac{dV}{V} = -\frac{1}{\tau}$$

En intégrant, on obtient aisément (K et C sont des constantes) :

$$\ln(V) = -\frac{t}{\tau} + K \Rightarrow \boxed{V_H(t) = C e^{-\frac{t}{\tau}}}$$

2. Solution particulière de l'équation différentielle avec second membre

$$\frac{dV}{dt} + \frac{V}{\tau} = g \cdot (1 - \alpha)$$

Le second membre étant une constante, on recherchera alors une solution particulière constante. On suppose donc que :

$$V_p(t) = K \Rightarrow \frac{dV}{dt} = 0$$

Et on obtient donc immédiatement en réinjectant ceci dans l'équation différentielle :

$$\frac{K}{\tau} = g \cdot (1 - \alpha) \Rightarrow K = g \cdot \tau \cdot (1 - \alpha)$$

D'où l'expression de la solution particulière :

$$\boxed{V_p(t) = g \cdot \tau \cdot (1 - \alpha)}$$

3. Solution générale

Comme dit précédemment, la solution générale de l'équation différentielle est égale à la somme des 2 solutions homogène et particulière trouvées précédemment en 1 et 2, soit :

$$V(t) = C e^{-\frac{t}{\tau}} + g \cdot \tau \cdot (1 - \alpha)$$

Au temps $t=0$, la vitesse de la bille est nulle. On a donc :

$$V(0) = C + g \cdot \tau \cdot (1 - \alpha) = 0 \Rightarrow C = -g \cdot \tau \cdot (1 - \alpha)$$

On en déduit alors l'expression de la vitesse de la bille au cours du temps, solution générale de l'équation différentielle :

$$V(t) = g \cdot \tau \cdot (1 - \alpha) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

On constate que quand $t \rightarrow +\infty$, la bille atteint une vitesse limite dont la valeur est donnée par :

$$V_{lim} = g \cdot \tau \cdot (1 - \alpha)$$

D'où l'expression de la vitesse en fonction de cette vitesse limite :

$$V(t) = \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \cdot V_{lim}$$

On peut considérer que cette vitesse limite est atteinte lorsque le temps écoulé est de 5τ (99 % de la vitesse limite).

ii. Cas des forces de frottement proportionnelles à la vitesse

On est dans le cas de figure où l'équation différentielle a l'expression suivante :

$$\frac{dV}{dt} + \frac{V^2}{\tau} = g \cdot (1 - \alpha)$$

La résolution de cette équation différentielle étant hors programme au lycée, nous ne donnerons ici que l'expression théorique de la vitesse limite :

$$V_{lim} = \sqrt{g \cdot \tau \cdot (1 - \alpha)}$$

6. ACQUISITION ET ANALYSE

a. Matériel nécessaire

Pour réaliser l'étude par vidéo, il est impératif d'avoir recours à une webcam autorisant l'ajustement des paramètres d'acquisition tels que le nombre d'images par seconde et le temps d'exposition par image.

Pour réaliser l'expérience dans de bonnes conditions, il est nécessaire d'avoir en plus du dispositif réf. CHUTFLU2 :

- 1 statif avec tige de 750 cm
- 1 noix de serrage
- 1 pince 3 doigts
- Un jeu de 3 billes de même diamètre et de masse différente.
- 1 ordinateur
- 1 webcam 30 images/s minimum avec réglage du temps d'exposition (nous conseillons la réf. HDCM)
- 1 logiciel d'analyse de vidéo (AVISTEP, AVIMECA ou tout autre logiciel dédié)

b. Installation et réglages

- Monter la noix de serrage et la pince 3 doigts sur le statif.
- Positionner la webcam horizontalement sur la pince 3 doigts
- Régler la distance à l'éprouvette et la hauteur de la webcam de manière à avoir entièrement l'éprouvette dans le champ de vision.
- Régler l'objectif de la caméra de manière à avoir une image nette : les graduations doivent être visibles.

c. Acquisition vidéo

La procédure à suivre dépend bien entendu de la webcam utilisée.

Nous donnons ci-dessous la procédure à suivre à votre notre webcam réf. HDCM avec le logiciel fourni AMCAP.

- **Choix de la caméra et du microphone**

Par défaut il se peut que la source vidéo sélectionnée par le logiciel soit bien la webcam que l'on désire utiliser. Sélectionnez dans le menu « Devices » la caméra à utiliser.

Bien que ce ne soit pas nécessaire dans notre cas, il est possible également de choisir la source audio.



- **Résolution vidéo et format vidéo**

L'expérience ne nécessite pas une résolution vidéo très importante.

Pour paramétrer la résolution et le format de compression vidéo, aller dans le menu « Options » et sélectionner « Video Capture Pin ».

Afin de limiter l'espace disque occupé par les fichiers vidéo, il est préférable de se limiter à une résolution de 640x480 pixels.

On choisira également le mode de compression YUY2 compatible avec les logiciels couramment utilisés (AVISTEP, AVIMECA).

Dans tous les cas, les fichiers vidéo sont « encapsulés » en .avi ; il n'est ainsi pas nécessaire d'utiliser de logiciel de conversion de format !

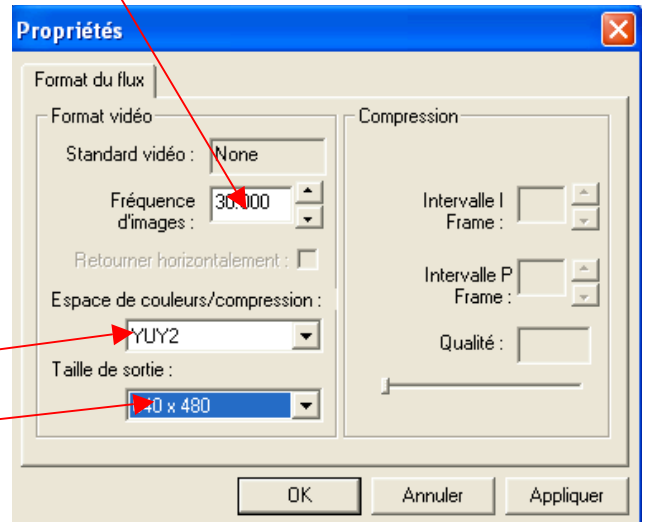
- **Nombre d'images par seconde**

Il faut adapter le nombre d'images par seconde à la durée de l'expérience de manière à avoir un nombre suffisant de points mais pas trop non plus pour que le pointage ne soit pas trop long.

Dans le cas de la chute dans un fluide, on sélectionnera par exemple 30 images/s pour le cas de la bille la plus dense et 20 images/s pour les billes les plus légères.

Tout comme une trop grande résolution, un trop grand nombre d'images/s aboutit à des fichiers vidéo volumineux.

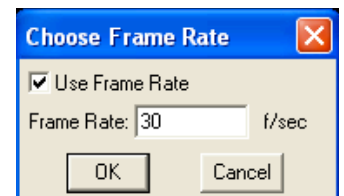
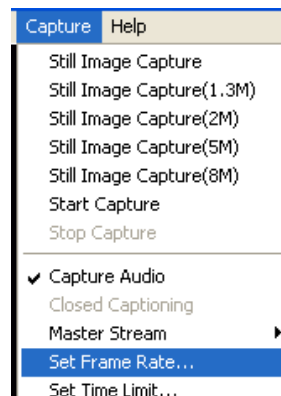
Nombre d'images/s



Format de compression vidéo

Résolution

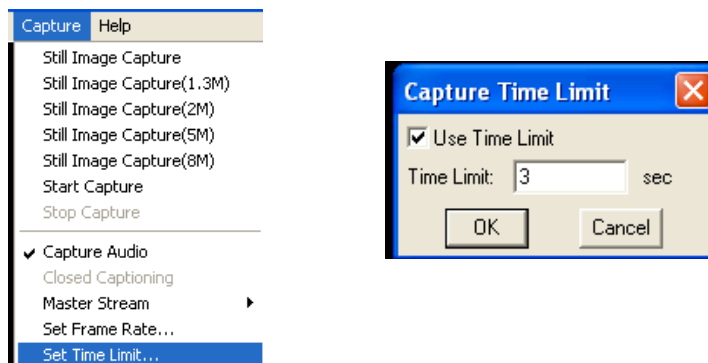
Afin de forcer le logiciel à faire une acquisition au nombre d'image par seconde choisi, sélectionner dans le menu « Capture » la ligne « Set Frame Rate ». Dans la fenêtre qui s'ouvre, taper le nombre d'images par seconde désiré (ici 30) et cocher la case « Use Frame Rate ».



• Durée de la vidéo

En fonction de la durée de l'expérience, on choisira le temps qui convient.

Pour les mêmes raisons de taille de fichier que le taux d'images et la résolution, on choisira une durée assez courte. Dans le menu « Capture », sélectionner « Set Time Limit » et entrer la durée d'enregistrement souhaité.



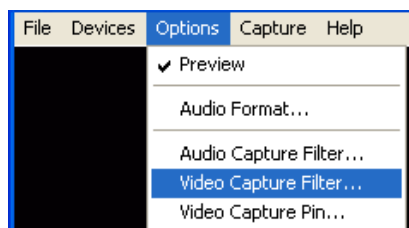
• Temps d'exposition

Ce paramètre est le plus important. Il correspond au temps d'ouverture du capteur lors de l'acquisition d'une image. Plus le temps est court et plus nette sera la position de l'objet en mouvement. Inversement, un temps d'exposition long impliquera une trainée sur l'image correspondant au déplacement du mobile dans le champ de la caméra pendant le temps d'exposition.

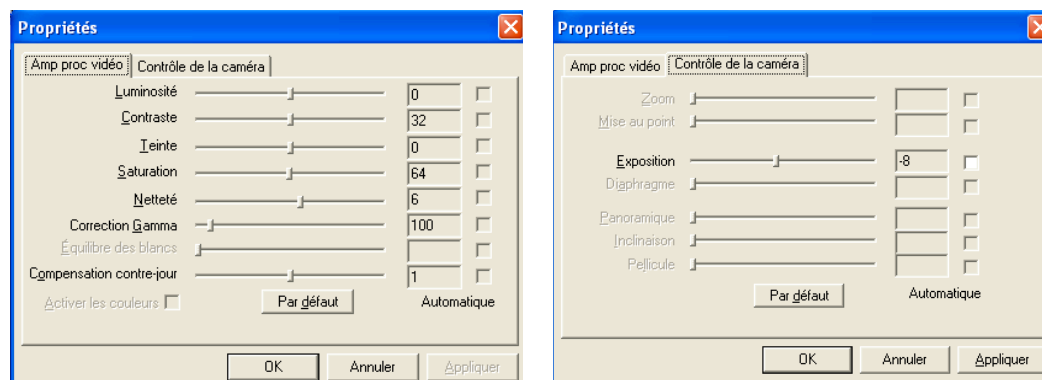
Bien entendu, un temps d'exposition trop court sous-entend une plus faible quantité de lumière reçue au niveau du capteur et donc une image plus sombre.

Il faut donc trouver le bon compromis entre la netteté et la quantité de lumière reçue. Ceci dépendant de l'éclairage de la scène filmée et de la vitesse du mobile, le temps d'exposition est à déterminer au mieux expérimentalement.

Pour régler le temps d'exposition, sélectionner « Video Capture Filter » dans le menu « Options ». Si ce n'est pas fait par défaut, cocher la première ligne « Preview » qui permettra de visualiser instantanément l'impact des réglages sur la vidéo.



Pour partir d'une base correcte, on s'assurera que les valeurs initiales sont les valeurs par défaut (valeurs automatiques). Pour ceci, il suffit de cliquer sur les boutons « Par défaut » dans les 2 onglets « Amp proc vidéo » et « Contrôle de la caméra ». On obtient ainsi une image nette et lumineuse.

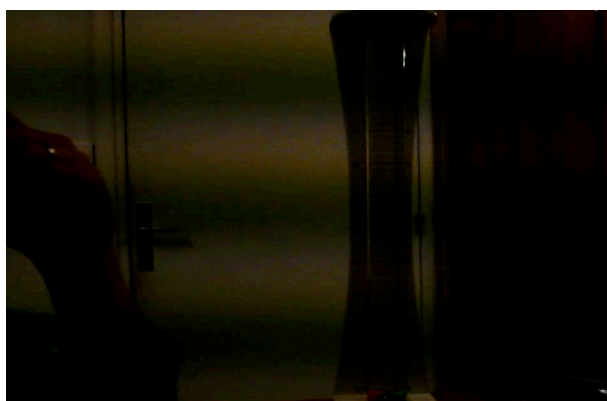
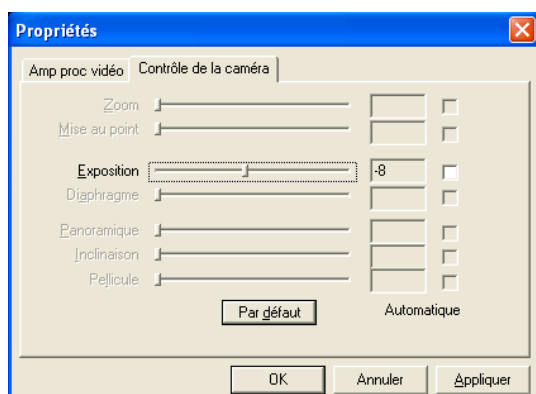


Dans l'onglet « Contrôle de la caméra », un seul paramètre est accessible à l'utilisateur et c'est justement celui qui nous intéresse : « Exposition ».

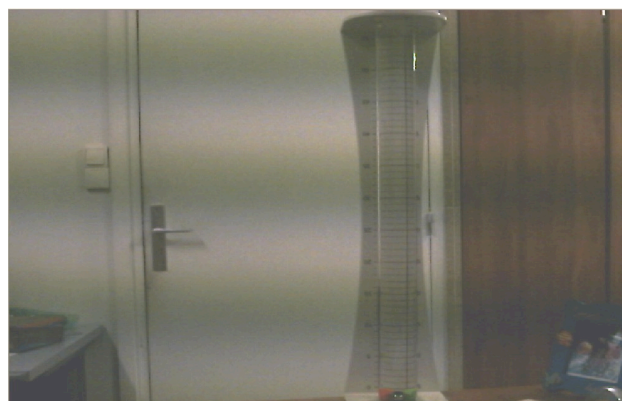
Déplacer le curseur horizontalement et sélectionner la valeur souhaitée. Malheureusement, les valeurs négatives indiquées n'ont pas de signification physique. Il n'y a par conséquent pas d'autres choix que de tester.

Décocher la ligne « Exposition » à droite sans quoi ce paramètre restera en contrôle automatique. On peut ainsi visualiser directement le résultat sur la vidéo.

Prenons par exemple une valeur -8. On voit aussitôt la vidéo s'assombrir fortement, rendant celle-ci inexploitable.

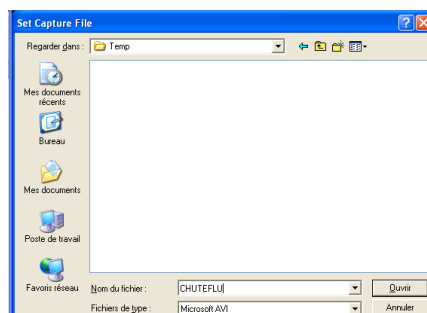
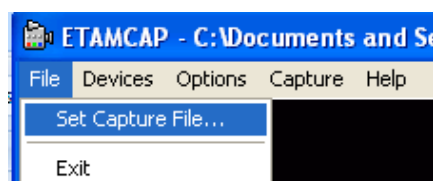


Comme dit précédemment, le fait de diminuer le temps d'exposition impacte directement la quantité de lumière reçue au niveau du capteur. Afin de remédier à ce problème, on peut éclairer la scène de manière à augmenter la quantité de lumière reçue par image et/ou jouer artificiellement sur la vidéo en augmentant la luminosité et le contraste comme ci-dessous. La qualité n'est pas excellente mais suffisante pour le pointage.



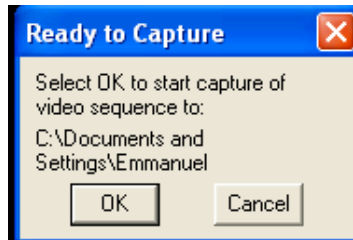
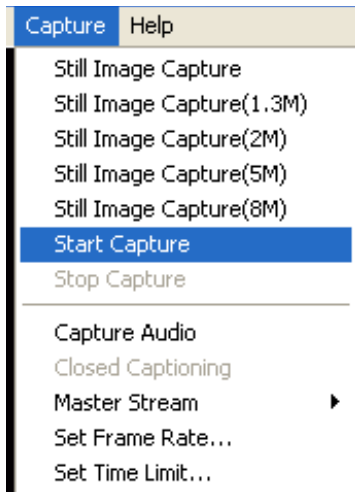
• Emplacement fichier

Lorsque l'enregistrement est terminé, la vidéo est sauvegardée sur le disque. Pour choisir l'emplacement où sera sauvee la vidéo, sélectionner dans le menu « File » la ligne « Set capture file » et indiquer le nom et l'emplacement du fichier : « CHUTEFLU.avi ».



• **Capture vidéo**

Une fois tous les paramètres vidéos définis, il ne reste plus qu'à prendre la dite vidéo. Dans le menu « Capture », sélectionner « Start Capture ». Une fenêtre s'ouvre alors vous indiquant où sera enregistré la vidéo et vous invitant à cliquer sur « OK » pour démarrer l'acquisition vidéo » ou sur « Cancel » pour annuler.



La vidéo étant lancée, retirer verticalement et rapidement l'aimant pour laisser tomber la bille dans l'éprouvette remplie de fluide.

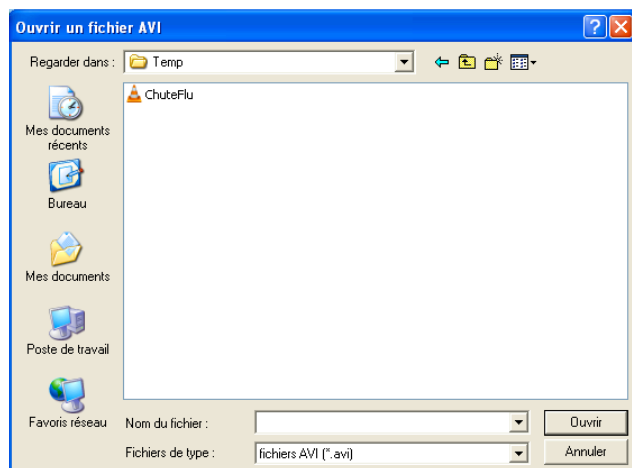
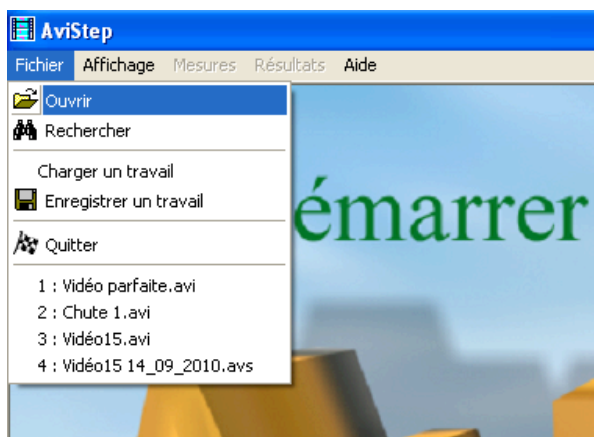
Une fois l'acquisition vidéo terminée, visualiser le fichier vidéo CHUTEFLU.avi à l'emplacement choisi. Si tout est correct, il est temps de passer au pointage de la vidéo.

d. Pointage vidéo

On utilisera ici le logiciel gratuit AVISTEP téléchargeable sur internet. Lancer le logiciel et suivez la marche à suivre ci-dessous.

1. Ouvrir le fichier vidéo

Dans le menu « Fichier », cliquer sur « Ouvrir » et sélectionner le chemin et le fichier vidéo.

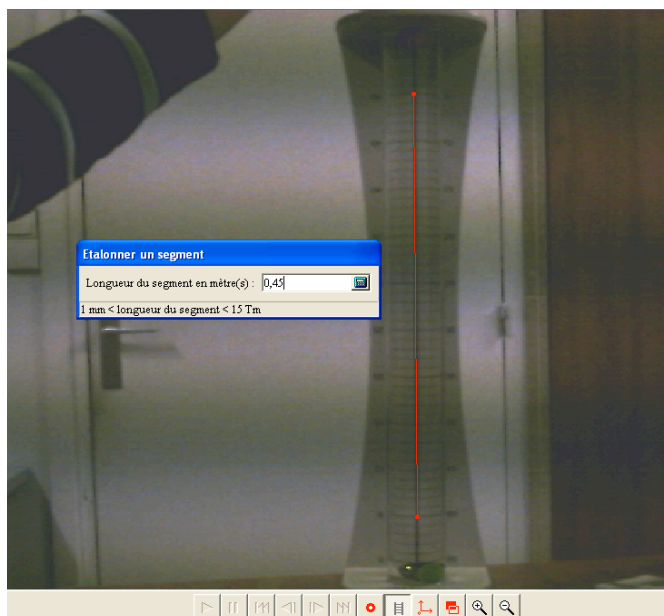


2. Echelle

Sélectionner l'outil échelle en rouge dans la barre d'outils située en bas de la fenêtre.

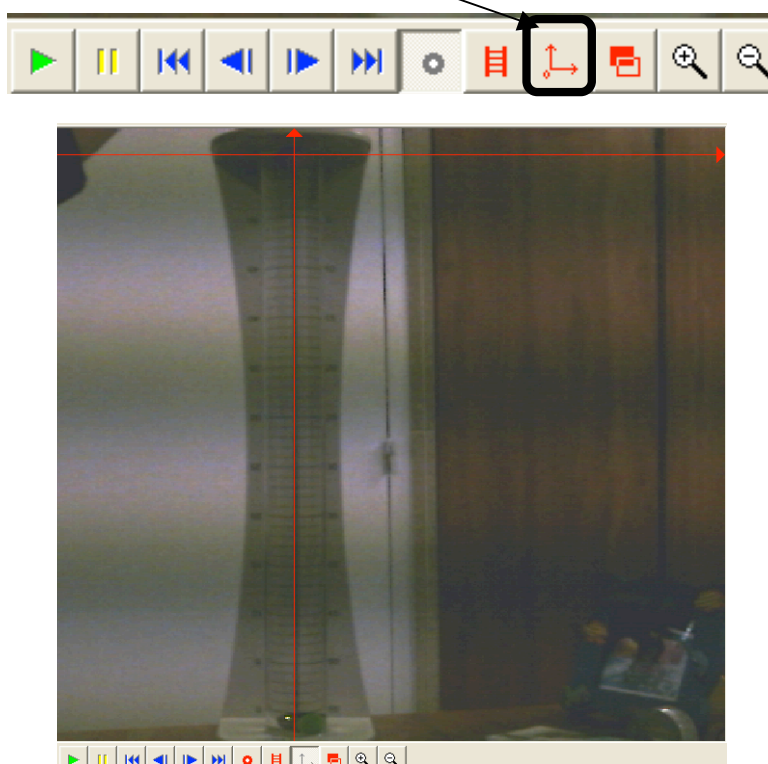


Placer l'extrémité de la baguette sur une graduation de l'éprouvette et cliquer pour indiquer le premier point. Placer l'extrémité de la baguette sur une autre graduation distante de la première et cliquer pour indiquer le second point. L'échelle graduée tous les 5 cm sur le support de l'éprouvette permet de repérer aisément ces points. Dans la fenêtre qui s'ouvre, donner la distance en mètres et appuyer sur ENTREE pour valider.



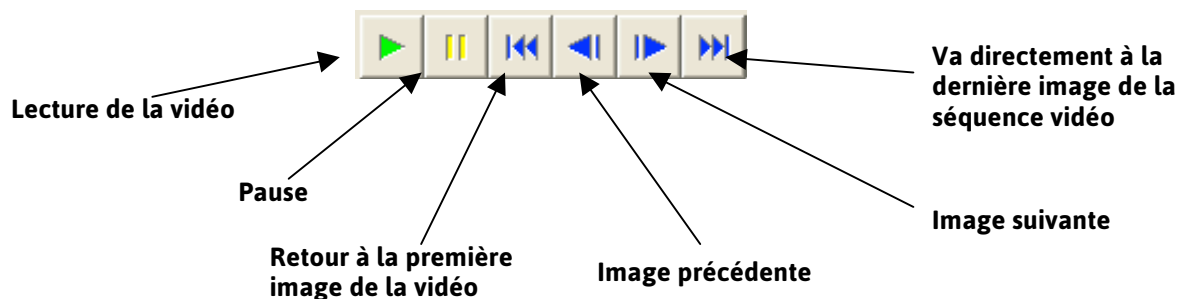
3. Définition d'un repère

Afin de définir le repère, cliquer sur l'outil « Axes » et positionner l'origine dans la fenêtre vidéo.

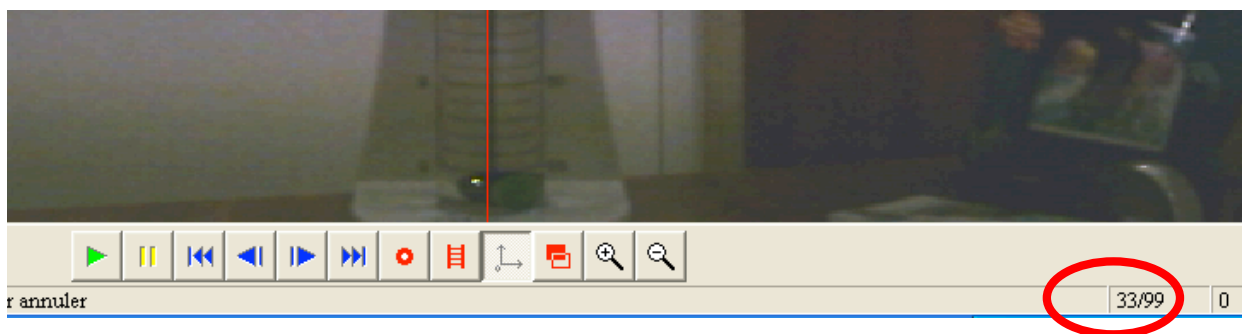


4. Recherche de l'origine des temps

Afin de réaliser le pointage uniquement sur la portion de vidéo utile correspondant à la chute, on recherche la première image de la chute. On utilise pour ceci la barre de lecture vidéo située en bas de la fenêtre.

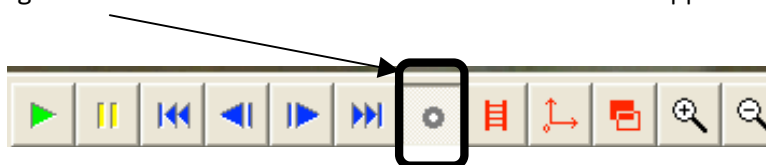


Le numéro d'image et le nombre total d'images est affiché en bas à droite de la fenêtre. Dans l'image ci-dessous, on est par exemple à la 33^{ème} image sur un total de 99 images que contient la vidéo.

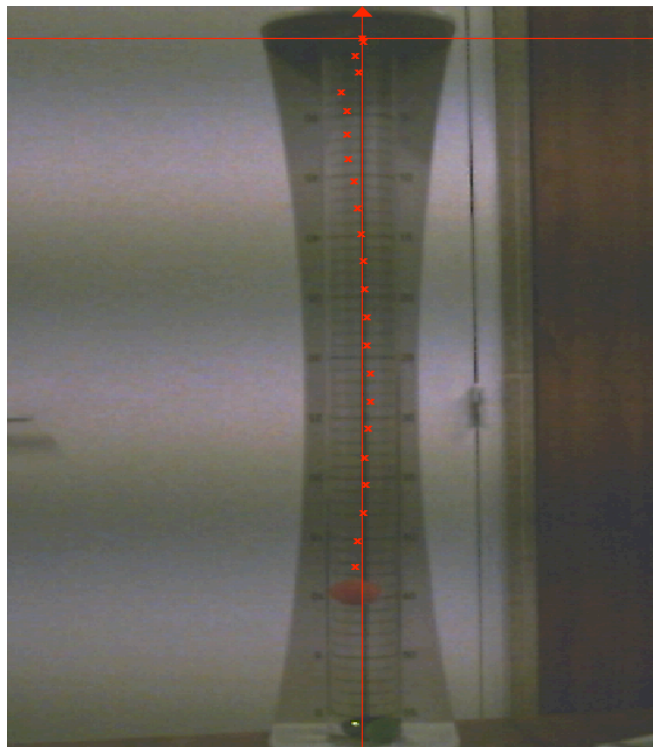


5. Pointage vidéo

Sélectionner l'outil « Pointage » dans la barre d'outils en bas de fenêtre. Une mire apparaît.

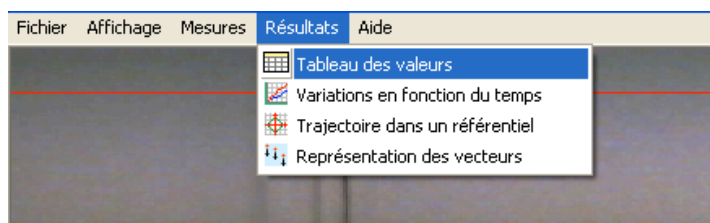


Positionner la mire sur la bille et cliquer. Le logiciel marque d'un point la position de la bille et passe automatiquement sur l'image suivante. Recommencer l'opération jusqu'à la fin de la chute. En cas d'erreur, un clic sur le bouton droit de la souris annule la dernière opération.



6. Tableau des valeurs

Une fois le pointage terminer, aller dans le menu « Résultats » et sélectionner « Tableau des valeurs »

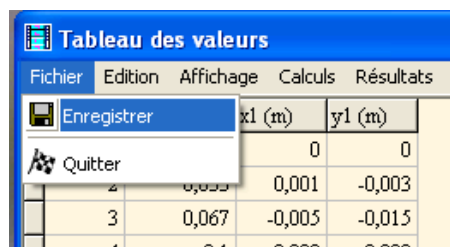


Une fenêtre intitulée « Tableau des valeurs » s'ouvre, contenant un tableau de valeurs constitué de 4 colonnes et N lignes correspondant au N points relevés à l'étape précédente.

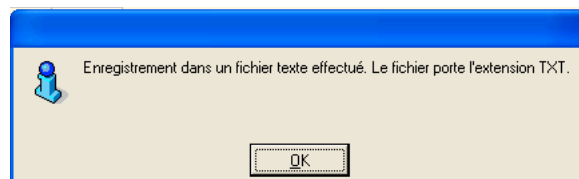
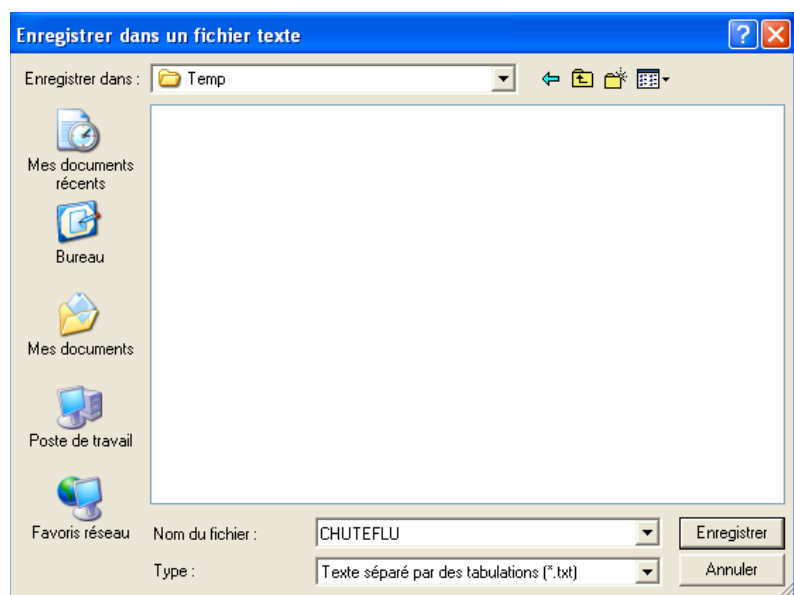
Numéro	Date (s)	x1 (m)	y1 (m)
1	0	0	0
2	0,033	0,001	-0,003
3	0,067	-0,005	-0,015
4	0,1	-0,002	-0,028
5	0,133	-0,015	-0,045
6	0,167	-0,01	-0,06
7	0,2	-0,01	-0,08
8	0,233	-0,01	-0,1
9	0,267	-0,006	-0,118
10	0,3	-0,003	-0,141
11	0,333	-0,001	-0,162
12	0,367	0,001	-0,184
13	0,4	0,002	-0,208
14	0,433	0,003	-0,231
15	0,467	0,003	-0,254
16	0,5	0,006	-0,277
17	0,533	0,006	-0,301
18	0,567	0,004	-0,323
19	0,6	0,002	-0,347

Les colonnes liées à des champs peuvent être déplacées ou redimensionnées

Pour sauvegarder les valeurs dans un fichier, aller dans le menu « Fichier » de cette fenêtre et sélectionner « Enregistrer ».

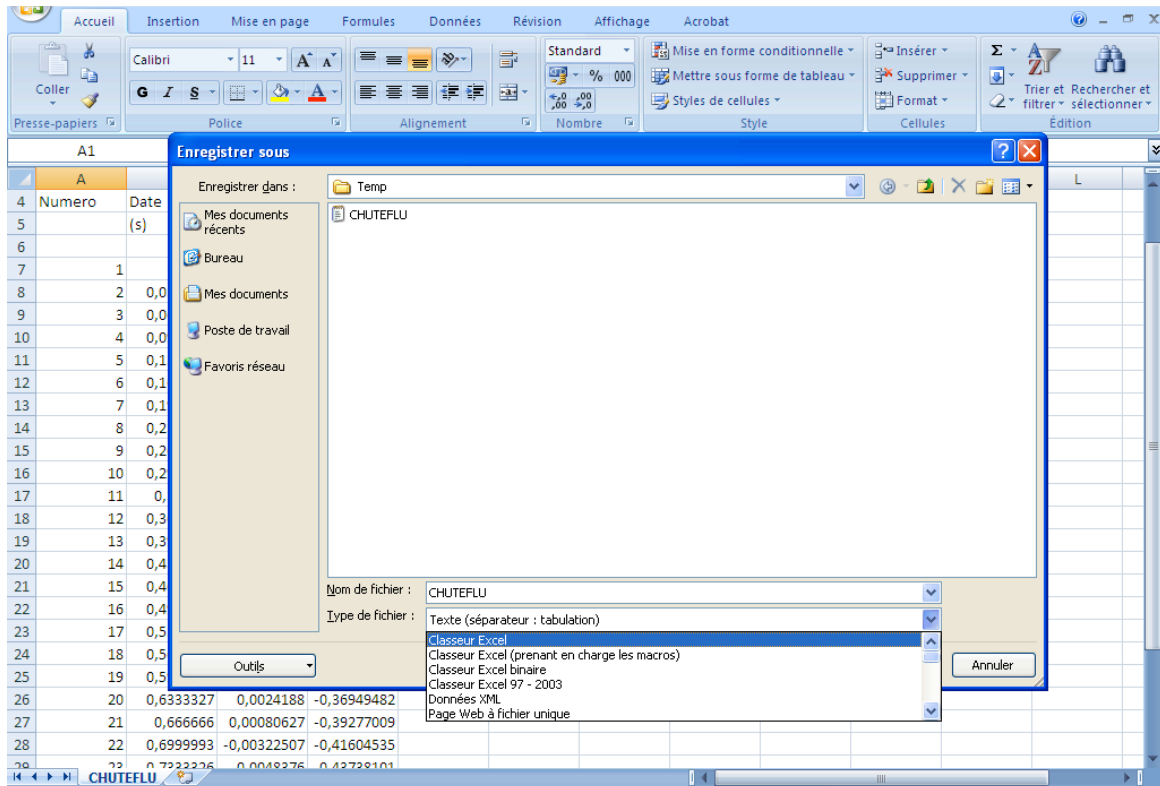


Une fenêtre s'ouvre invitant l'utilisateur à entrer le nom du fichier TXT souhaité et à choisir le répertoire où sauvegarder ce fichier. Une fois validé ses choix, une fenêtre s'ouvre indiquant que le fichier a été sauvegardé avec une extension .TXT. Cliquer sur « OK » pour fermer cette fenêtre.



Afin de pouvoir traiter les données, ouvrir le fichier TXT avec Excel en faisant un clic droit sur le fichier et en sélectionnant « Ouvrir avec » puis « Microsoft Office Excel ».

Sauvegarder à nouveau le fichier au format Excel cette fois-ci en faisant « Enregistrer sous » puis en changeant le format de fichier « Texte (séparateur : tabulation) » par « Classeur Excel ».



7. Analyse

Trois billes de même diamètre 20 mm et de masses différentes sont disponibles en option (Réf. COULBIL). Une des billes est entièrement métallique tandis que les deux autres sont munies d'un noyau métallique avec coque plastique d'épaisseur différente.

- Bille 1 : noyau métallique de Ø 12 mm et coque d'épaisseur 4 mm / couleur orange
- Bille 2 : noyau métallique de Ø 14 mm et coque d'épaisseur 2 mm / couleur verte
- Bille 3 : entièrement métallique, Ø 20 mm / couleur grise

Pour plus de précision, on prendra soin de peser les billes avant l'expérience pour en déterminer la masse volumique précisément.

Un aimant (non fourni) permet de sélectionner aisément la bille choisie lorsque les 3 billes sont contenues dans l'éprouvette.

i. Bille 1 / orange

Ouvrir le fichier excel sauvegarder et renommer éventuellement les colonnes.

La première colonne correspond au numéro d'image, la seconde colonne au temps, x1 à l'abscisse horizontale et y1 l'ordonnée verticale.

Nous ne tiendrons pas compte de l'évolution de l'abscisse dans notre étude. Ceci fausse un peu les résultats car la vitesse calculée n'est pas la vitesse réelle de la bille, mais si l'éprouvette est bien verticale et si le lâché de la bille est réalisé correctement (aimant enlevé rapidement et verticalement), les variations en X doivent être faibles.

On ajoute une 5^{ème} colonne au tableau que l'on nommera « V » pour vitesse.

On calcule la vitesse par la méthode de l'encadrement ; on applique la formule suivante :

$$V_i = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}}$$

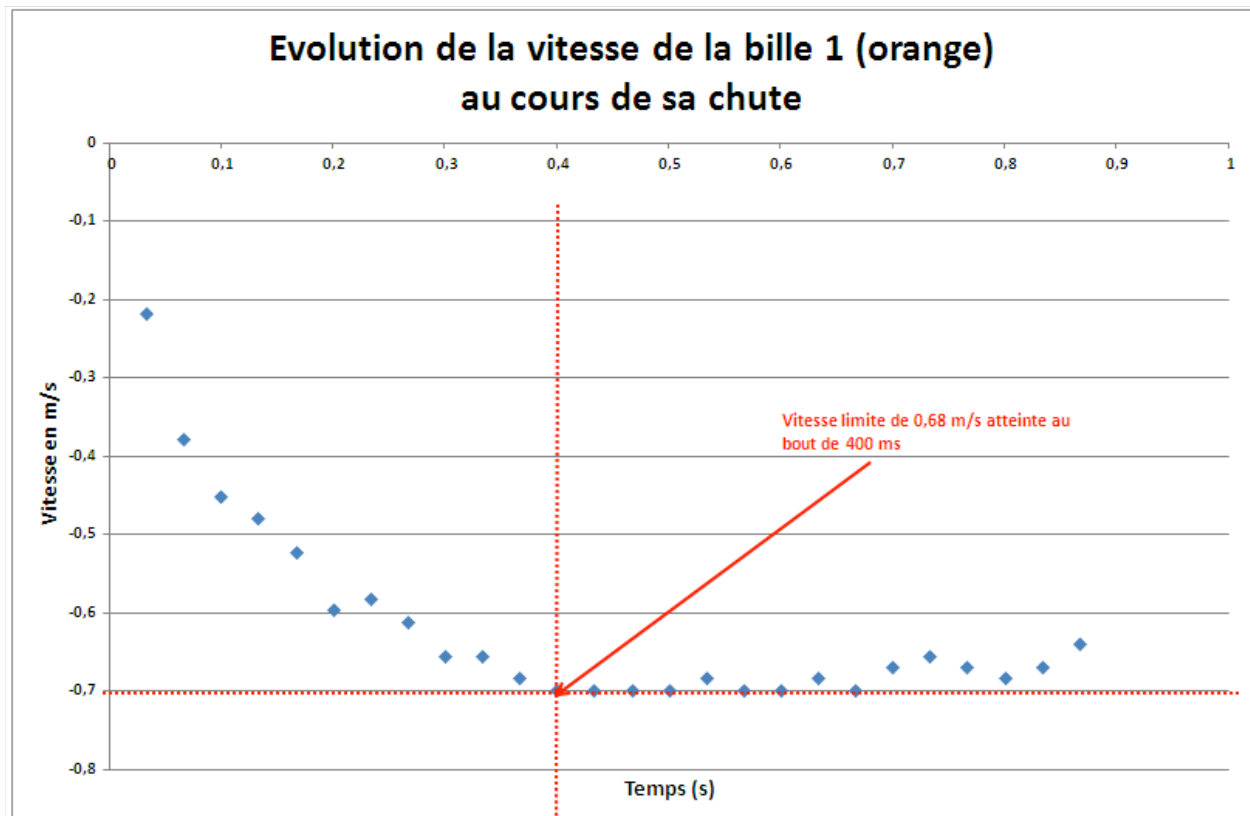
Pour des raisons évidentes, on ne pourra pas calculer les vitesses du premier et du dernier point. La formule dans Excel se traduit par :

4	Numero	Date	x1	y1	V
5		(s)	(m)	(m)	(m)
6					
7	1	0	0	0	
8	2	0,0333333	0,000806267	-	$= (D9-D7)/(B9-B7)$
9	3	0,0666666	-0,004837604	-0,01454704	
10	4	0,0999999	-0,002418802	-0,028124278	

Dans notre cas, les vitesses sont négatives car l'origine a été choisie en haut de l'éprouvette, au point de départ de la bille.

Il suffit ensuite de représenter graphiquement la vitesse en fonction du temps pour découvrir le régime de chute. La chute dure un peu moins de 9/10^{ème} de seconde.

On distingue très clairement sur la courbe une vitesse limite de 0,68 m/s atteinte au bout de 400 ms.

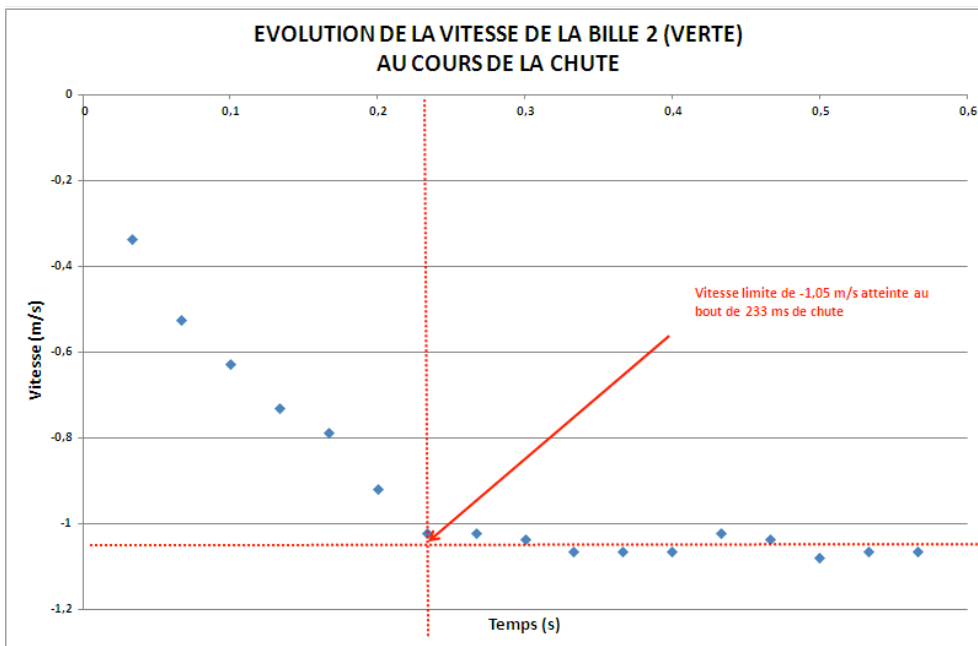


ii. Bille 2 / verte

On procède de la même manière que pour la bille n° 1 orange.

Comme on pouvait s'en douter, la bille chute plus rapidement et atteint le fond de l'éprouvette en seulement 6/10^{ème} de seconde.

Une vitesse limite plus grande de 1,05 m/s est atteinte plus rapidement après seulement 233 ms.

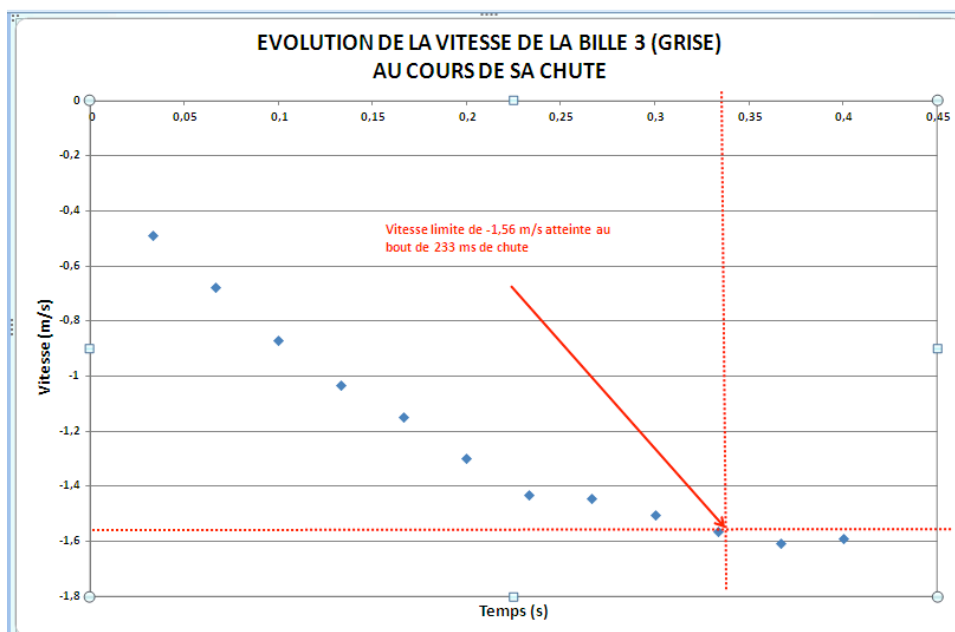


iii. Bille 3 / grise

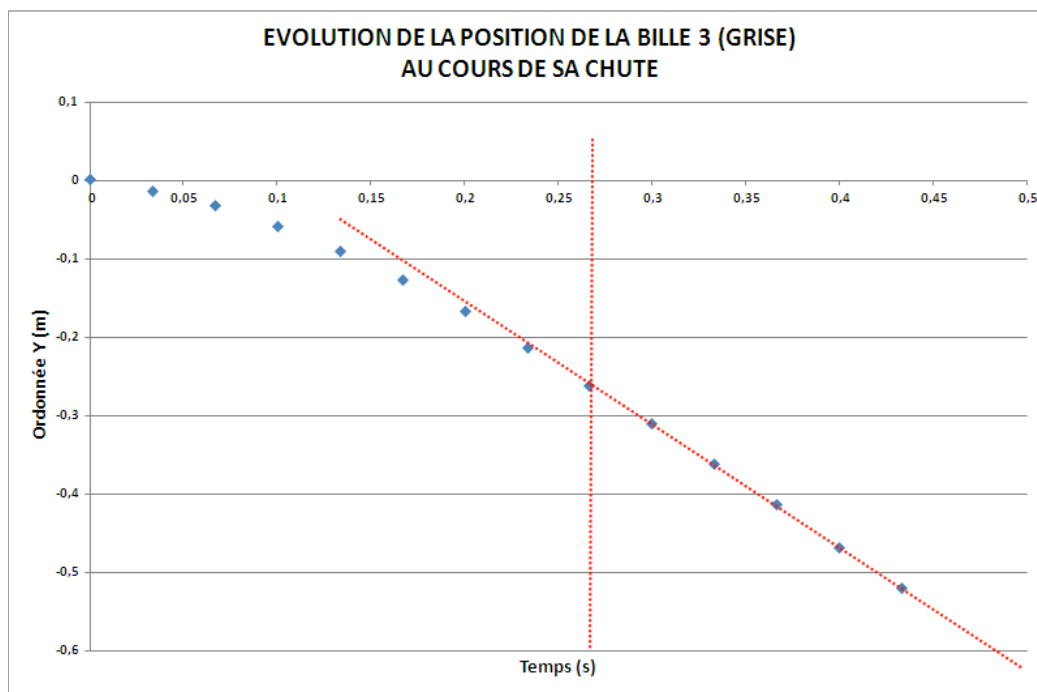
On procède de la même manière avec la bille la plus dense.

La chute est plus rapide que dans les 2 cas précédents : 433 ms.

La vitesse limite est atteinte en fin de chute et est donc graphiquement plus difficile à déterminer.



On peut procéder différemment pour la déterminer avec plus de précision. Il suffit de tracer la trajectoire de la bille sur l'axe des ordonnées y en fonction du temps.



On constate qu'à partir du 9^{ème} point, la courbe devient rectiligne. On sélectionne cette partie de la courbe et on réalise une régression linéaire sur cette partie de la courbe uniquement. Le coefficient directeur de la droite donne la valeur de la vitesse limite. On trouve ici une vitesse limite de 1.56 m/s.

