

Utilisation d'un aimant pour l'étude en travaux pratiques de la chute verticale, libre et avec freinage

par **Pierre DUPLÀA** et **Denis GAUTHIER**

Lycée Bernard Palissy - 47000 Agen
pierre.duplaa@ac-bordeaux.fr

RÉSUMÉ

Lors d'une chute verticale d'un aimant à l'intérieur d'un tube métallique, les courants de Foucault créés dans ce dernier sont à l'origine de la force de freinage subie par l'aimant. Ce dernier atteint rapidement une vitesse limite. Cet article est plus particulièrement axé sur l'approche expérimentale du phénomène sous la forme d'un TP, en s'appuyant sur les bases théoriques et expérimentales développées dans différents articles cités en annexe [1 à 3]. Conformément aux nouveaux programmes de terminale S et de première S, on s'intéressera plus particulièrement au mouvement de chute verticale, libre et avec freinage magnétique.

1. DISPOSITIF UTILISÉ

1.1. Détection du passage d'un aimant à travers une bobine

1.1.1. Mise en évidence

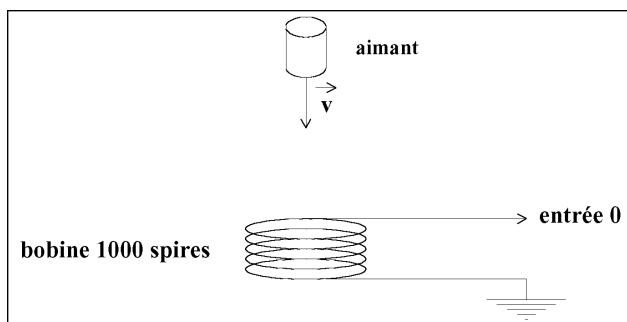


Figure 1

Suivant l'aimant et la bobine utilisés, on amplifiera la tension par un montage AO inverseur avec un coefficient adapté. Deux types d'aimant ont été utilisés dans le TP :

- ♦ aimant au néodyme [4]
- ♦ aimant cylindrique gainé de bleu issu du jeu pour les « enfants », Géomag [5].

1.1.2. Courbe d'évolution de la tension aux bornes de la bobine

Au passage de l'aimant à travers la bobine, l'acquisition informatisée (carte Sysam-PCI et logiciel Synchronie) détecte deux pics opposés de la tension aux bornes de la bobine. Suivant le branchement et la nature du pôle de l'aimant qui arrive d'abord, le premier pic est positif ou négatif.

La courbe de la figure 2 a été enregistrée avec un aimant de type « Géomag ». Pour une même hauteur de chute et une même bobine, l'amplitude de ces pics dépend de l'aimant. Pour un dispositif donné, les lois de l'électromagnétisme montrent que cette amplitude est proportionnelle à la vitesse de l'aimant lors de la rentrée ou de la sortie de la bobine.

Le changement de signe de la tension donne l'instant où l'aimant passe au centre de la bobine. La connaissance de la position du centre de la bobine et de cet instant permet de déterminer la position de l'aimant à une date t donnée.

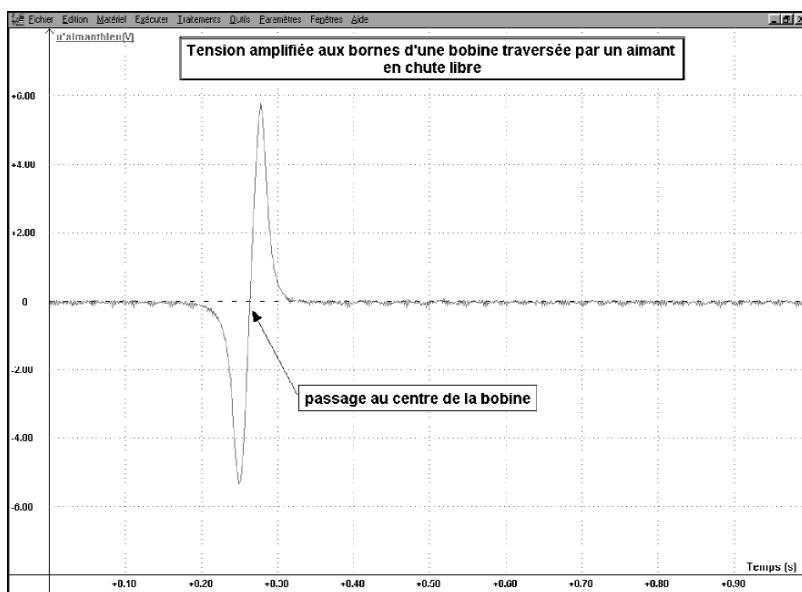


Figure 2

1.2. Dispositif utilisé pour l'étude des différentes chutes (cf. figure 3)

L'aimant est maintenu à l'aide d'un électroaimant (cf. photo 1) constitué d'une simple bobine de poste à transistor, alimentée par une tension continue ($E = 4,5 \text{ V}$) délivrant un courant d'environ $1,5 \text{ A}$. La tension aux bornes de l'interrupteur est appliquée à l'entrée EA0 de l'ordinateur. L'ouverture de ce circuit déclenche la chute et l'acquisition synchronisée sur le passage de cette tension de 0 à E .

L'aimant libéré passe à l'intérieur d'une goulotte électrique cylindrique en PVC

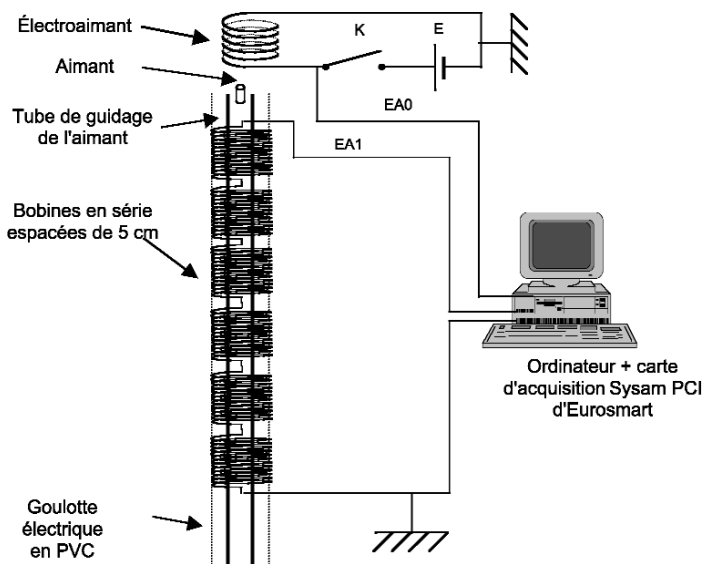


Figure 3



Photo 1 : L'électroaimant.



Photo 2 : Le tube de guidage.

(diamètre intérieur 16 mm, extérieur 18 mm ; longueur 1 m). Sur cette goulotte, on a réalisé avec un fil de cuivre gainé (diamètre 0,6 mm) des bobines de 30 spires, régulièrement espacées de 5 cm (*cf.* photo 2). Ces bobines sont montées en série et la tension aux bornes de l'ensemble est appliquée au boîtier Bora de la carte Sysam-PCI, après amplification par un montage amplificateur inverseur (ici $\times 100$).

1.3. Mise en évidence du freinage magnétique

Expérience qualitative

Avec un chronomètre, on mesure les durées (Δt_1 , Δt_2 et Δt_3) de la chute de l'aimant au néodyme dans respectivement trois tubes de guidage (PVC, aluminium, cuivre) de longueur 1 m et de même diamètre intérieur 1,4 mm.

Tube	PVC	Aluminium	Cuivre
Conductivité (S/m)	Isolant électrique ($< 10^{-13}$)	$37,7 \cdot 10^6$	$59,6 \cdot 10^6$
Épaisseur (mm)	2	1,5	1,5
Δt (s)	0,5	7	10

Tableau 1

On constate que Δt_2 et Δt_3 sont très élevés devant Δt_1 .

Interprétation

Le phénomène d'induction crée aux bornes de la bobine ouverte, une tension au passage de l'aimant. Les tubes métalliques sont assimilables à une succession de spires en circuit fermé. Au passage de l'aimant, le phénomène d'induction donne naissance ici à des courants de Foucault, qui créent un champ magnétique vertical s'opposant au déplacement de l'aimant. Il apparaît une force de freinage magnétique, expliquant Δt_2 et Δt_3 grands devant Δt_1 . Cette force varie comme l'intensité des courants de Foucault, explication d'un freinage moins fort dans le tube d'aluminium où la résistivité plus grande donne des courants plus faibles.

2. CHUTE VERTICALE LIBRE

2.1. Chute verticale libre d'un aimant

2.2.1. Enregistrement

On utilise l'aimant « Géomag ». Le tube de guidage de l'aimant est un tube PVC de diamètre intérieur 14 mm. L'acquisition est faite avec 1000 points, un échantillon de 1 ms pour une durée totale de 1 s. Elle est déclenchée à 1 V montant sur l'entrée EAO aux bornes de l'interrupteur K dont l'ouverture entraîne la chute de l'aimant.

L'aimant a tendance lors de sa chute à se mettre en travers dans le tuyau. Pour éviter

cela, il suffit de le lester par exemple avec une vis (cf. photo 3) pour déplacer son centre de gravité vers le bas.

En effet, le champ magnétique au centre de l'aimant est nul. Mais le gradient axial de champ est au contraire très important. De ce fait, l'aimant est en position d'équilibre instable. Des frottements solides peuvent apparaître au niveau des contacts aimant-parois dont les effets seront atténués en déplaçant le centre de gravité de l'aimant par ce lestage.

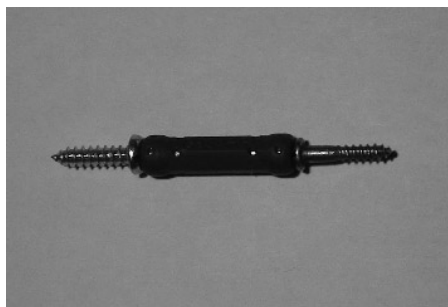


Photo 3 : L'aimant de type « Géomag » lesté ici par deux vis. Dimension de l'aimant sans les vis : 2,5 cm.

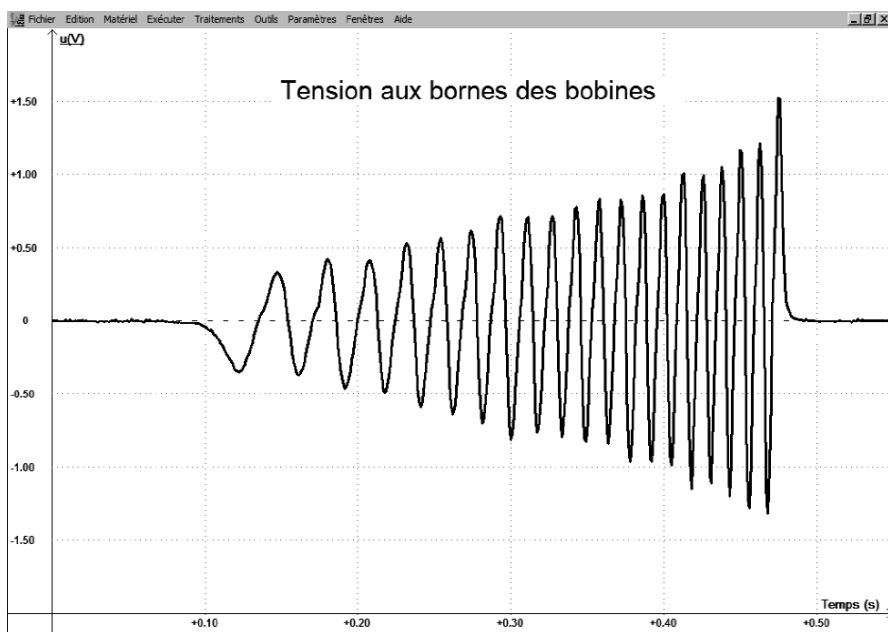


Figure 4

Remarque : L'amplitude des pics étant directement proportionnelle à la vitesse d'entrée ou de sortie des bobines, la croissance des pics devrait être plus régulière. Pour y remédier, nous avons augmenté le nombre de points d'acquisition (10 000 points), sans amélioration notable. Il est possible que la séparation des pics ne se fasse pratiquement pas pour les raisons suivantes : les bobines sont probablement trop proches et l'aimant avec sa surcharge trop long.

Pour ces raisons, nous avons déterminé le temps de passage de l'aimant au centre

de chaque bobine par le repérage sur la courbe de la figure 4 des changements de signe de la tension à la traversée de chaque bobine.

2.2.2. Étude du mouvement

Méthode

Les dates de passage de l'aimant au niveau des centres successifs des bobines ne sont pas données seules par la fonction seuil de la Feuille de calcul ($\text{date}=\text{seuil}(u,T,0,1)$), qui détecte aussi des passages dus à des parasites autour de la valeur 0 V avant et après la traversée des bobines. On utilise la fonction seuil pour des niveaux symétriques faibles (à adapter) autour du 0 V et on prend la moyenne des dates :

- ◆ $\text{date1} = \text{seuil}(u, T, -0.1, 1)$
- ◆ $\text{date2} = \text{seuil}(u, T, 0.1, 1)$
- ◆ $\text{date} = (\text{date1} + \text{date2}) / 2$

Dans le Tableur, on crée une nouvelle variable **h**, unité **mètre** (créer dans la fenêtre ouverte en cliquant sur + de sa barre d'outils), donnant les positions successives de l'aimant ; on rentre ensuite manuellement les valeurs correspondant à une progression arithmétique de pas 0,05 (en corrigeant éventuellement si l'écartement des bobines varie).

Courbes d'évolution

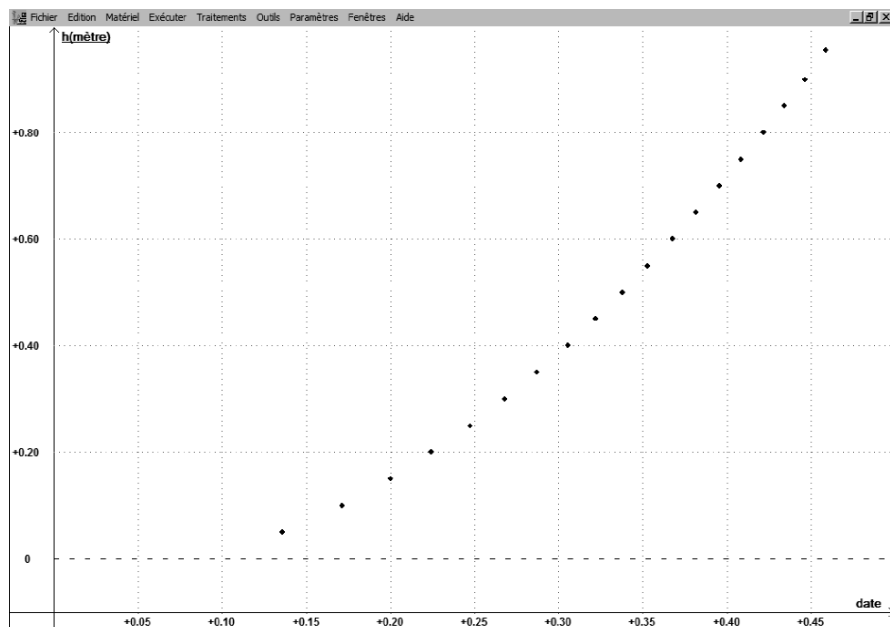


Figure 5

♦ *Du paramètre de position d*

En **Fenêtre 2**, on trace h en fonction de la variable **date** en points discontinus (cf. figure 5).

♦ *De la vitesse*

Dans la **Feuille de calcul** : $v = \text{deriv}(h, \text{date})$

En **Fenêtre 3**, on trace v en fonction de la variable **date** en points discontinus. Et on la modélise par une fonction affine de type $v_{\text{mod}} = a_0 + a_1 X$ (cf. figure 6).

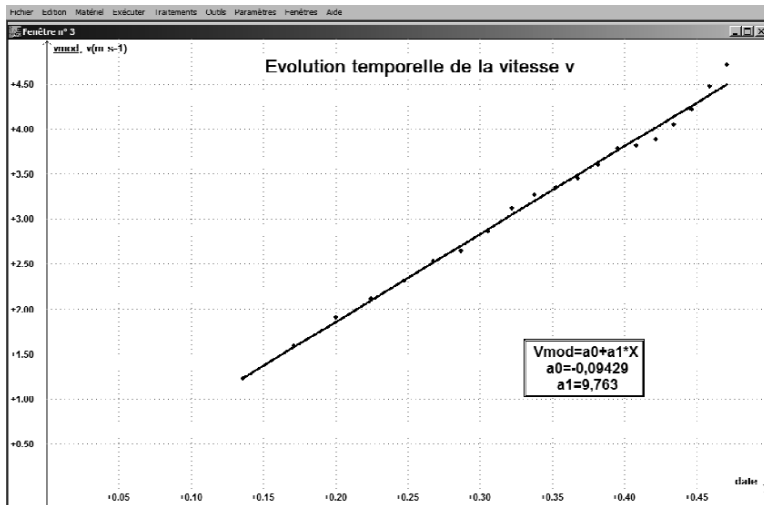


Figure 6

Conclusion

La modélisation de v par une fonction affine est de bonne qualité (coefficient de corrélation $R = 0,997$) : ce mouvement rectiligne est uniformément accéléré. La valeur obtenue pour l'accélération $9,76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ approche la valeur de g avec une précision du même ordre que la précision des mesures (proche de 1 %). Les forces de frottements de l'air sur l'aimant sont négligeables dans une telle expérience. La qualité de ces résultats justifie la méthode utilisée.

3. CHUTE VERTICALE AVEC FREINAGE MAGNÉTIQUE

3.1. Enregistrement

3.1.1. Dispositif

On reprend le même dispositif et on place à l'intérieur de la goulotte le tube de

cuivre précédent. On utilise encore l'aimant de jouet muni d'une surcharge (vis de fer) qui augmente le régime transitoire et stabilise la chute de l'aimant. Ce régime transitoire est trop bref avec l'aimant au néodyme.

3.1.2. Courbes $u(t)$

L'acquisition est faite avec 1000 points, un échantillon de 1 ms et une durée totale 1 s. Le déclenchement est pris sur l'entrée 0 à 0,5 V montant. L'amplitude d'abord croissante puis pratiquement constante des pics traduit un mouvement avec deux phases, accélérée puis uniforme.

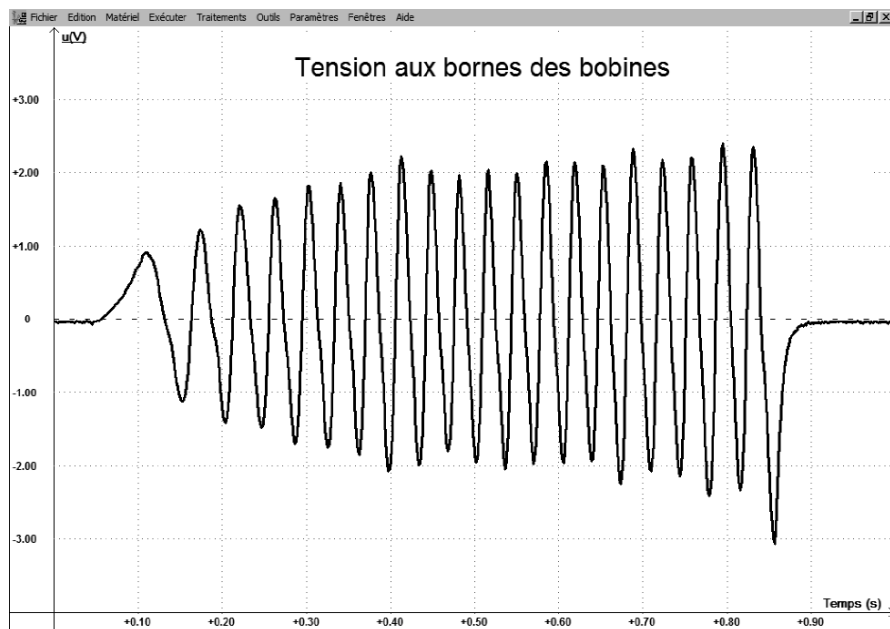


Figure 7

Remarque : On retrouve les mêmes irrégularités sur l'évolution des amplitudes des pics.

3.2. Étude du mouvement

Méthode

On utilise la même méthode que celle détaillée lors la chute libre pour déterminer les dates de passage au milieu des bobines, dans la **Feuille de calcul**.

- ◆ $\text{date1} = \text{seuil}(u, T, -0.5, 1)$
- ◆ $\text{date2} = \text{seuil}(u, T, 0.5, 1)$

♦ $\text{date} = (\text{date1} + \text{date2}) / 2$

Dans le **Tableur**, on recrée ensuite la variable **h**, unité **mètre**.

Courbes d'évolution

♦ Du paramètre de position h

En **Fenêtre 2**, on trace **h** en fonction de la variable **date** en points discontinus (cf. figure 8).

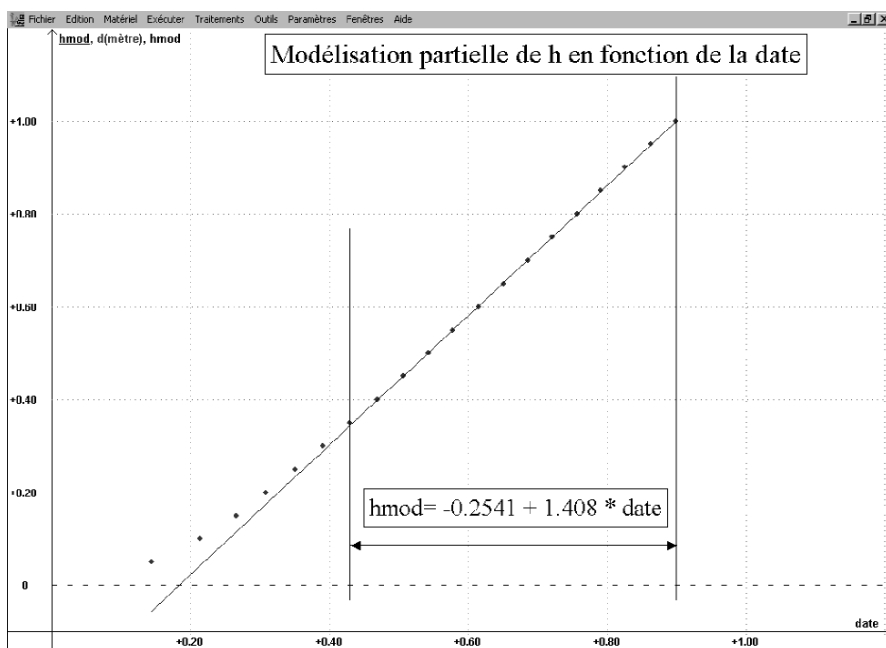


Figure 8

La deuxième partie de la courbe $h(\text{date})$ se modélise bien par une fonction linéaire (coefficient de corrélation $R = 0,999$) mettant en évidence l'existence d'une vitesse limite. La valeur du coefficient directeur permet d'avoir une première évaluation de la vitesse limite atteinte par l'aimant ($v_{\text{lim}} \approx 1,41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

♦ De la vitesse

Dans la **Feuille de calcul** : $v = \text{deriv}(h, \text{date})$

En **Fenêtre 3**, on trace **v** en fonction de la variable **date** en points discontinus. Et on la modélise (cf. figure 9).

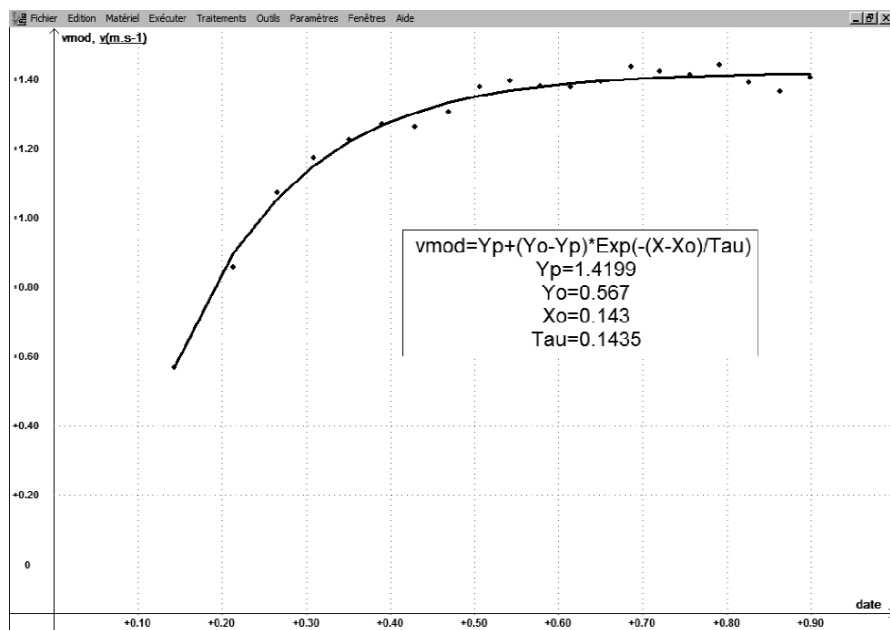


Figure 9

Conclusion

La modélisation très satisfaisante (coefficient de corrélation $R = 0,994$) de la courbe de la vitesse par une fonction exponentielle montre que la force de freinage magnétique peut être modélisée par une force proportionnelle à la vitesse de chute v du barreau aimanté dans le tube. De plus, la valeur de Y_p est compatible avec la valeur du coefficient directeur de la modélisation partielle de $h(\text{date})$.

CONCLUSION

Ce TP est facilement facile à mettre en œuvre dans le cadre des programmes de première S et terminale S. C'est une bonne alternative aux TP classiques de chute libre et dans les fluides visqueux. Les élèves sont très intrigués et intéressés par la mise en évidence du phénomène de freinage magnétique ce qui suscite de leur part de nombreuses questions.

Par rapport au programme de terminale S, on pourra aussi étudier l'évolution de la vitesse de l'aimant par la méthode d'Euler à l'aide d'un tableur. Il suffit de récupérer sous synchronie au format d'un fichier texte les valeurs de la vitesse au cours de la chute et de les relire à l'aide d'un tableur.

On peut aussi s'intéresser à l'influence de la masse de l'aimant sur l'évolution

temporelle de la vitesse de ce dernier. Pour ce faire, il suffit de lester l'aimant avec par exemple des vis (cf. photo 3).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DEIBER A., MARKIEWICZ L., KEMPF O., PAVIET F. et le groupe GRESEP. Phénomène d'induction associé au mouvement d'un aimant dans un tube de cuivre. *Bull. Un. Phys.*, mars 2000, vol. 94, n° 822 (1), p. 487-509.
- [2] PIVOT J.-C. Enregistrement magnétique et mesure de g. *Bull. Un. Phys.*, mars 2000, vol. 94, n° 822 (1), p. 565-576.
- [3] DEIBER A., MARKIEWICZ L., KEMPF O., PAVIET F. et le groupe GRESEP. Chute freinée d'un barreau aimanté en travaux pratiques. *Bull. Un. Phys.*, avril 2000, vol. 94, n° 823, p. 725-744.
- [4] FILLoux J.-C. Expérience des tubes « paresseux » : les courants de Foucault et la loi de Lenz revisités. *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, novembre 2003, vol. 97, n° 858 (1), p. 1499-1505.

RENSEIGNEMENTS DIVERS

- [5] Aimants « géomag », importés par GIOCHI PRECIOZI FRANCE, s'achètent dans tous les magasins de jeu.
Service consommateur - Tél. : 03 84 43 32 16.



Pierre DUPLÀA

*Professeur agrégé de sciences physique
Lycée général et technologique Bernard Palissy
Agen (Lot-et-Garonne)*



Denis GAUTHIER

Professeur retraité