

## Balance de Cavendish U40205

### Instructions d'utilisation

03/10 ALF



### 1. Description

La balance de Cavendish permet de mettre en évidence la force de gravitation entre deux masses et de définir la constante gravitationnelle.

La pièce centrale de la balance est un pendule de torsion composé d'un renfort longitudinal et de deux billes de plomb suspendues horizontalement à un mince filament de tungstène. La position de repos est influencée par la force de gravitation des deux grosses billes de plomb sur les petites billes. Après le basculement des grosses billes dans une nouvelle position, le pendule de torsion oscille autour de la position de repos modifiée. La rotation est mesurée à

l'aide d'un capteur capacitif différentiel qui supprime les niveaux de bruit et de vibration dans le signal puis enregistrée sur un ordinateur. Pour poursuivre l'évaluation, les données peuvent être exportées dans un tableur. Il est également possible de démontrer le mouvement à l'aide d'un indicateur lumineux.

Grâce à la courte durée d'oscillation de 2 – 4 min (en fonction de la longueur du filament de tungstène), la constante gravitationnelle peut être déterminée pendant une heure de cours avec une précision inférieure à 10 %.

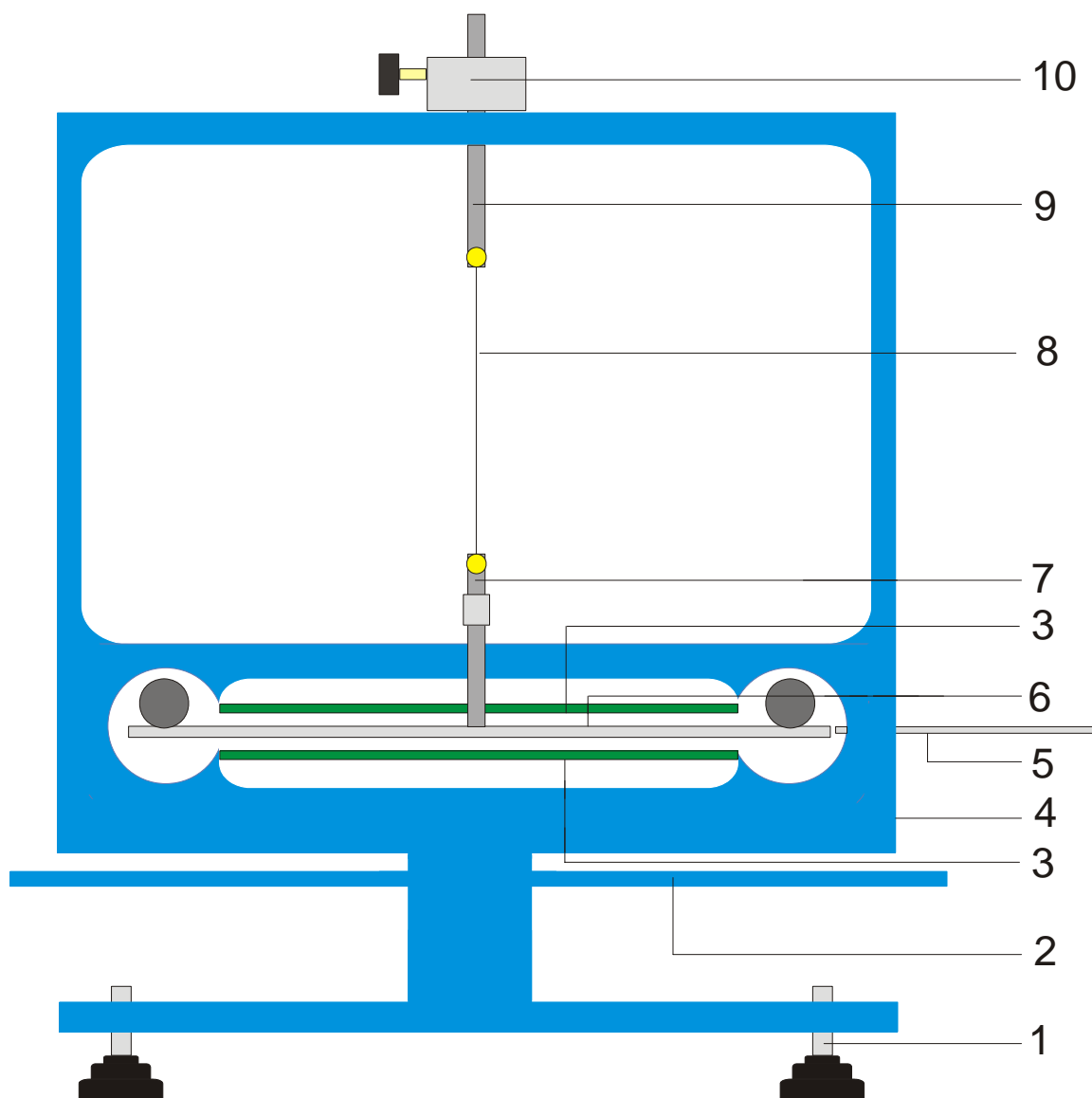


Fig. 1 Composants de la balance de Cavendish

1 Pieds réglables, 2 Renfort longitudinal extérieur pour les grosses billes de plomb, 3 Capteur capacitif différentiel, 4 Connexion USB, 5 Tige de centrage, 6 Renfort longitudinal intérieur pour les deux petites billes de plomb, 7 Suspension inférieure avec miroir, 8 Filament de tungstène, 9 Suspension supérieure, 10 Support pivotant avec échelle angulaire

## 2. Volume de livraison

- 1 boîtier avec vitres
- 1 rouleau de filament de tungstène
- 1 suspension inférieure avec miroir
- 1 suspension supérieure
- 1 renfort longitudinal intérieur
- 1 tige de centrage
- 1 tige en aluminium à filetage
- 2 petites billes de plomb
- 2 grosses billes de plomb
- 1 logiciel de mesure
- 1 câble USB

## 3. Caractéristiques techniques

Masse des grosses billes de plomb :	env. 1 kg chacune
Masse des petites billes de plomb :	env. 15 g chacune
Force de gravitation :	$< 10^{-9}$ N
Fil de torsion :	tungstène, 25 $\mu$ m
Durée d'oscillation :	2 – 4 min
Résolution angulaire :	25 $\mu$ rad
Taux d'échantillonnage :	0,5, 1, 2, 5, 10 échantillons/s
Dimensions :	env. 190x180x200 mm <sup>3</sup>
Poids :	env. 5 kg

## 4. Manipulation

### 4.1 Consignes de sécurité

Le laser à diode (U22000) satisfait aux prescriptions de sécurité du laser de classe II. En cas d'utilisation conforme, l'expérience avec le laser à diode est sans danger.

- Suivre les consignes du mode d'emploi du laser.
- Ne pas regarder directement dans le rayon laser ou dans le rayon réfléchi.
- Eviter de dépasser les limites d'éblouissement, c'est-à-dire qu'aucun observateur ne doit se sentir ébloui.

### 4.2 Consignes concernant le lieu de l'expérience

Le capteur capacitif différentiel supprime les niveaux de bruit et de vibration dans le signal. Malgré tout, il est nécessaire de choisir un poste de travail à l'abri des vibrations. De fortes vibrations (par exemple des claquements de portes) ne peuvent pas être supprimées et déforment le signal.

### 4.3 Installation du logiciel et connexion à l'ordinateur

Avant que l'appareil soit opérationnel, le logiciel doit être installé et l'appareil raccordé à un ordinateur ou à un ordinateur portable.

- Insérer le CD du logiciel dans le lecteur CD de l'ordinateur.
- Ouvrir Windows Explorer et naviguer jusqu'au lecteur CD. Pour démarrer le programme d'installation, double-cliquer sur « setup.exe ». Suivre les instructions de l'assistant d'installation.
- Connecter la balance à l'ordinateur à l'aide du câble USB.
- Lancer le programme.

Si l'installation s'est correctement déroulée, une valeur en mrad s'affiche dans le coin supérieur gauche de la fenêtre.

Une description détaillée du logiciel se trouve à la section 5.

### 4.4 Réglage de la plage de mesure

- Retirer les vitres du boîtier.
- Visser la tige en aluminium à filetage au centre sur le renfort longitudinal intérieur. Le monter ensuite dans le boîtier de la balance et l'orienter de sorte que le renfort longitudinal se trouve au centre entre les deux platines de capteur.
- Installer les vitres. Connecter la balance à l'ordinateur et lancer le logiciel. Dans le logiciel, cliquer sur le bouton « Setup ».
- Tourner le renfort longitudinal dans le sens inverse des aiguilles d'une montre à l'aide du support, jusqu'à ce qu'il touche la vitre.

- Appuyer sur le bouton « Adjust left border », confirmer avec « OK » et définir ainsi la limite inférieure de la plage de mesure.
- Tourner à présent le renfort longitudinal dans le sens des aiguilles d'une montre jusqu'à ce qu'il touche à nouveau la vitre. Appuyer alors sur le bouton « Adjust right border », confirmer avec « OK » et définir ainsi la limite supérieure de la plage de mesure.

Le renfort longitudinal a été conçu avec des tenons à ses extrémités, de sorte qu'il oscille toujours sur une plage linéaire des plaques de condensateur.

Le logiciel de mesure enregistre toutes les valeurs de mesure comprises entre +60 et -60 mrad, le renfort longitudinal oscille normalement pendant l'expérience entre des valeurs en mrad inférieures.

La figure 2 indique les dimensions du renfort longitudinal intérieur. L'angle maximal est calculé facilement à partir de ces dimensions.

$$\alpha = \frac{(30 - 18,7)}{2} \div \frac{150}{2} = 75 \text{ mrad}$$

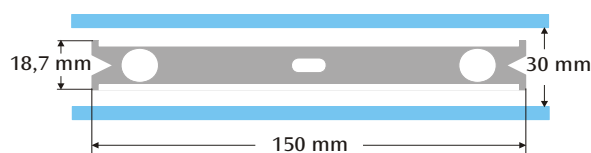


Fig. 2 Dimensions du renfort longitudinal intérieur

### 4.5 Montage du pendule de torsion

Remarque : Le montage du pendule de torsion est une tâche difficile, qui exige de la patience et une bonne vue. Le filament de tungstène est très mince et fragile, c'est pourquoi il doit être manipulé avec beaucoup de précautions. Pour que le filament soit bien visible, il est recommandé d'effectuer le montage du pendule de torsion sur du papier blanc.

- Placer la balance à l'horizontale sur une table de travail à l'abri des vibrations.
- Visser la suspension inférieure au centre sur le renfort longitudinal intérieur. Pour cela, veiller à ce que la surface du miroir soit parallèle au renfort longitudinal (cf. Fig. 3).
- A l'aide d'un petit tournevis, dévisser les vis de fixation des deux suspensions.
- Attacher la suspension supérieure avec un morceau de bande adhésive sur une feuille de papier blanc, afin de l'empêcher de rouler.
- Dérouler 8 à 10 cm de filament de tungstène du rouleau, mais ne pas le couper.
- Attacher l'extrémité du filament sur le papier à côté de la suspension supérieure avec un morceau de bande adhésive. Faire ensuite passer le filament autour de la vis de fixation et serrer la vis. Pour ce faire, veiller à ce que le filament ne soit pas déformé. Le filament doit se dérouler le plus au centre possible entre les deux suspensions (cf. Fig. 3).

- Placer ensuite la suspension inférieure sur le papier env. 4 à 5 cm sous la suspension supérieure. Guider le filament autour de la vis de fixation en tirant légèrement dessus et serrer la vis.
- Couper le filament sur le rouleau.
- Attacher avec précaution le pendule de torsion au niveau de la suspension supérieure à un statif et contrôler l'horizontalité du renfort longitudinal.
- Pour mettre le renfort longitudinal à l'horizontale, retirer à nouveau le pendule de torsion du statif et le poser avec précaution sur la table. Desserrer la vis de la suspension inférieure, maintenir la suspension avec la main et déplacer en conséquence le renfort longitudinal. Resserrer la vis et contrôler le positionnement.
- Introduire avec précaution le pendule de torsion

correctement orienté dans le boîtier. Pour cela, poser le renfort longitudinal sur la platine de capteur inférieure verte et guider la suspension supérieure dans le boîtier à travers le trou.

- Ajuster la hauteur à l'aide de la vis de blocage, de sorte que le renfort longitudinal puisse osciller librement entre les platines de capteur. La vis de blocage doit appuyer sur le côté plat de la suspension.
- Si le pendule n'oscille pas librement, répéter la procédure décrite ci-dessus pour positionner la suspension sur le renfort longitudinal. Une correction supplémentaire est possible à l'aide des pieds réglables.
- Placer la petite bille de plomb sur le renfort longitudinal intérieur et mettre en place les vitres.

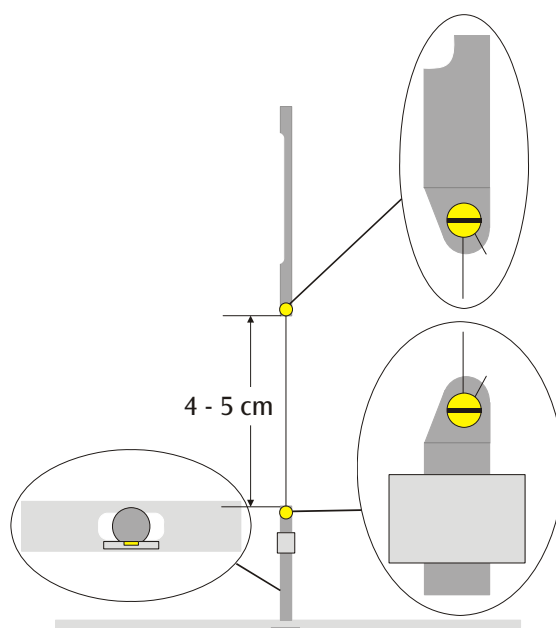


Fig. 3 Représentation schématique du pendule de torsion (coupe à gauche : renfort longitudinal avec suspension inférieure vue de dessus)

#### 4.6 Réglage du point zéro

Pour le réglage du point zéro, le laser suivant est recommandé comme indicateur lumineux :

Laser à diode, rouge, 650 nm U22000

- Poser la balance sur une table de travail à l'abri des vibrations, à environ 2 à 3 m d'un mur plat et la connecter à l'ordinateur (cf. Fig. 5).
- Monter le laser de sorte que le faisceau se trouve à la même hauteur que le miroir sur la suspension inférieure.
- Observer l'indicateur lumineux sur le mur.
- Patienter jusqu'à ce que les oscillations du pendule de torsion se soient atténuées.
- En tournant le support de la suspension supérieure, tourner le renfort longitudinal par petits pas, jusqu'à

ce qu'il touche la vitre. Une échelle à graduations de 45° peut servir d'aide : elle est posée autour du support sur le boîtier (cf. Fig. 4).

- Observer le déplacement de l'indicateur lumineux et marquer les déviations maximales vers la droite et la gauche sur un morceau de papier apposé au mur.
- A partir des repères de la déviation maximale, déterminer la position moyenne et la marquer également sur le mur.
- Placer le renfort longitudinal dans cette position moyenne en tournant le support et patienter jusqu'à ce que le pendule revienne au repos. Il est également possible de placer le renfort longitudinal en position moyenne à l'aide de la tige de centrage.

- Définir cette position comme la position zéro dans le logiciel.
- Conserver le montage expérimental ainsi pour la suite de l'expérience.

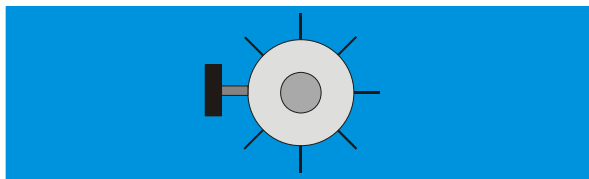


Fig. 4 Support du pendule de torsion avec échelle, vue du dessus.

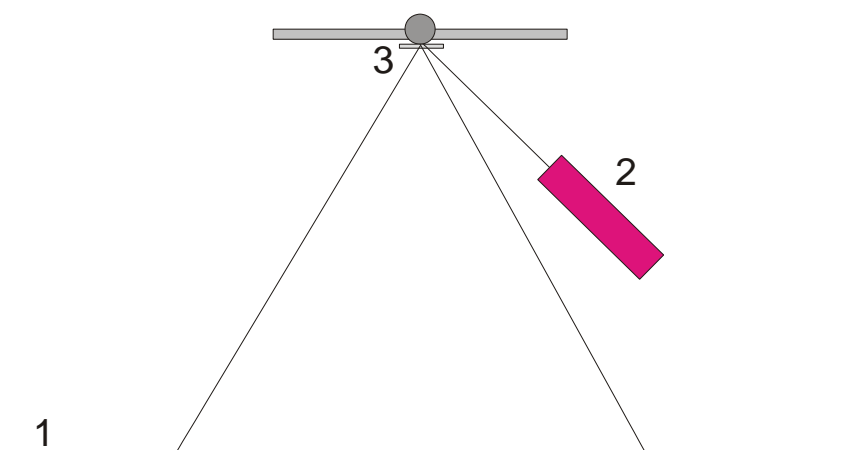


Fig. 5 Montage de l'indicateur lumineux pour le réglage du point zéro (1 mur, 2 laser, 3 miroir)

#### 4.7 Réalisation de l'expérience

- Placer les grosses billes de plomb sur le renfort longitudinal extérieur en position 1 (cf. Fig. 6) et patienter jusqu'à ce que les oscillations s'atténuent (observation de l'indicateur lumineux). Le cas échéant, étalonner le point zéro.
- Placer le renfort longitudinal extérieur en position 2 et démarrer la mesure.
- Lorsque les petites billes ont presque atteint leur position d'équilibre, déplacer le renfort longitudinal extérieur en position 3.
- Une fois que les petites billes ont presque atteint leur nouvelle position d'équilibre, arrêter la mesure.
- Enregistrer la courbe de mesure.

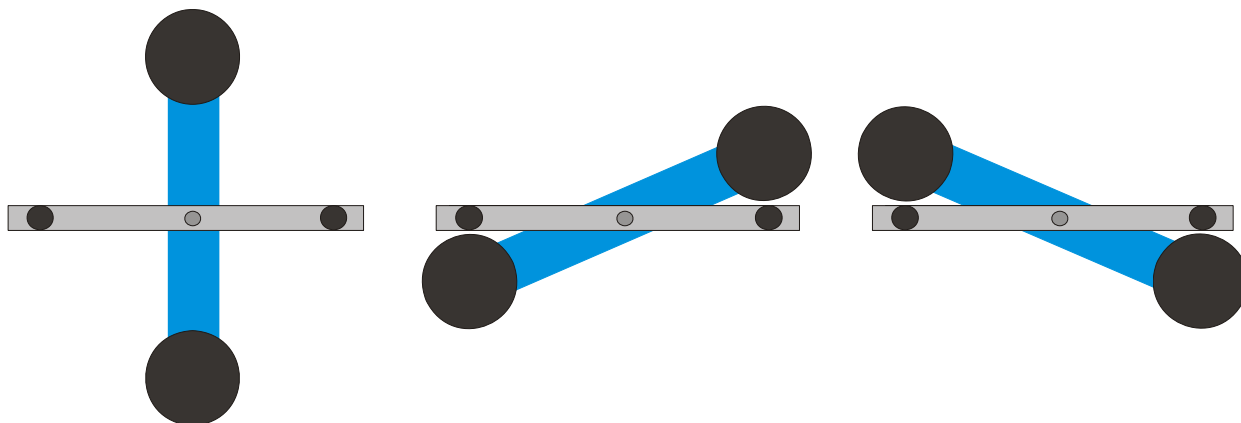


Fig. 6 Positions du renfort longitudinal extérieur (vue de dessus), à gauche : Position 1, au centre : Position 2, à droite : Position 3

## 4.8 Evaluation

### 4.6.1 Détermination de la position d'équilibre

- A partir des cinq premières déviations extrêmes après le basculement du renfort longitudinal extérieur en position 2, la position d'équilibre peut être calculée selon

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\alpha^{(1)} + \alpha^{(3)} + \alpha^{(5)}}{3} + \frac{\alpha^{(2)} + \alpha^{(4)}}{2} \right)$$

- Pour cela, placer le curseur sur le maximum et le minimum de la courbe et lire les valeurs dans le champ « Data » de la barre d'information.

Les valeurs peuvent également être relevées dans une liste Excel si les données ont été enregistrées dans un tableur.

- Calculer de la même manière la nouvelle position d'équilibre  $\alpha_2$  après le nouveau basculement en position 3.

### 4.6.2 Détermination de la constante gravitationnelle $G$

$m$  = Masse des petites billes

$r$  = Distance entre les billes et l'axe de rotation

$M$  = Masse des grosses billes

$M_B$  = Masse du renfort longitudinal intérieur

$L_B$  = Longueur du renfort longitudinal intérieur

$W_B$  = Largeur du renfort longitudinal intérieur

$b$  = Distance entre les petites et les grosses billes

$T$  = Durée d'oscillation

$k$  = Grandeur directionnelle de l'angle

$\Delta\alpha$  = Différence entre les positions d'équilibre  $\alpha_1 - \alpha_2$

Le moment d'inertie du pendule de torsion  $J_{\text{tot}}$  s'obtient à partir de la somme des moments d'inertie des petites billes  $J$  et du renfort longitudinal intérieur  $J_B$ .

$$J = 2 \cdot m \cdot r^2$$

$$J_B = \frac{1}{12} \cdot M_B \cdot (L_B^2 + W_B^2)$$

$$J_{\text{tot}} = J + J_B$$

$$\tau = k \cdot \Delta\alpha$$

$$k = \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 \cdot J_{\text{tot}}$$

$$\tau = G \cdot 2 \frac{m \cdot M \cdot r}{b^2} \cdot \left( 1 - \left( \frac{b}{\sqrt{b^2 + 4r^2}} \right)^3 \right)$$

La grandeur  $G$  est obtenue en appliquant et en convertissant l'équation.

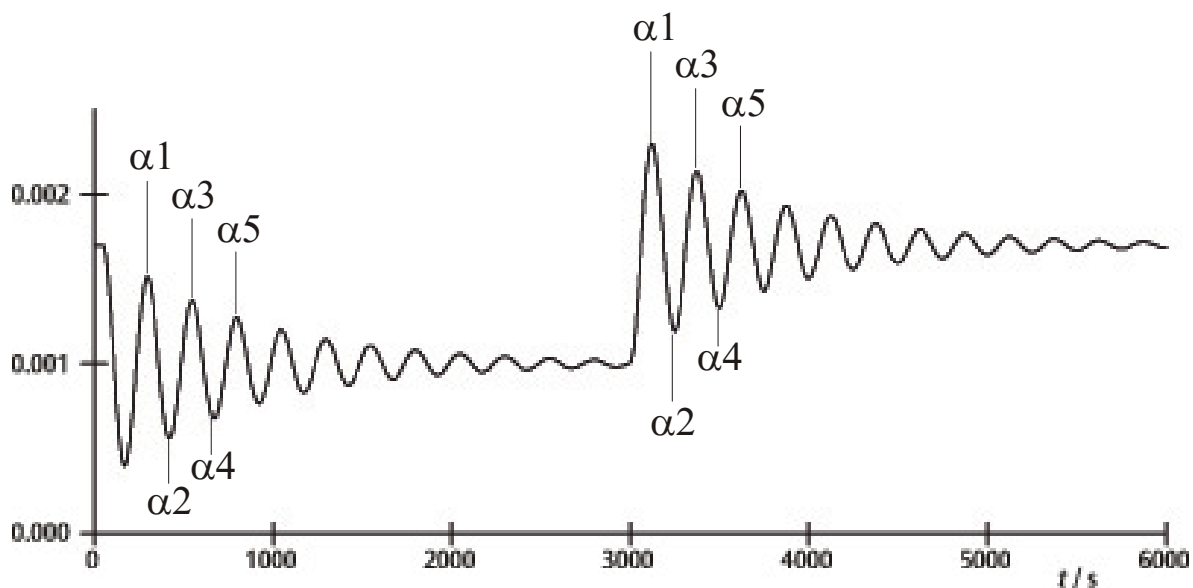


Fig. 7 Détermination des positions d'équilibre

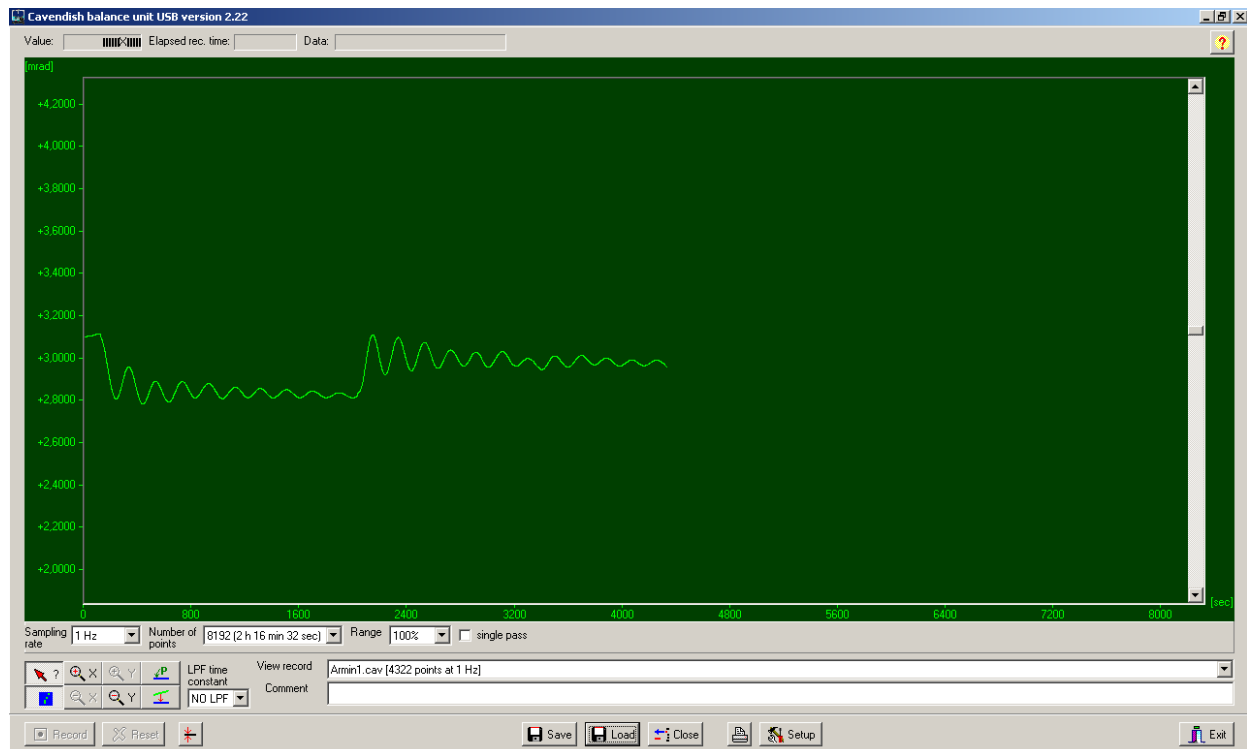


Fig. 8 Exemple d'une courbe de mesure

## 5. Description du logiciel

### 5.1 Barre d'information

La barre d'information en haut de la fenêtre comporte trois champs. Le champ « Value » indique la valeur de mesure actuelle de la balance. Le champ « Elapsed Time » indique la durée depuis le début de l'expérience et le champ « Data » indique les données à chaque point de la courbe de mesure, lorsque le curseur est déplacé au-dessus du graphique.

### 5.2 Barre « View Record »

A droite sous la fenêtre du diagramme se trouve la barre « View Record », dans laquelle sont affichées les informations suivantes : la vitesse de mesure, le mode de mesure « Single pass » (mesure simple) ou « Continuous » (mesure continue) et si la mesure est effectuée en temps réel ou si un enregistrement a été chargé.

### 5.3 Barre de commentaires

La barre de commentaires se trouve directement en-dessous de la barre « View Record ». Des commentaires relatifs à l'expérience peuvent y être entrés.

### 5.4 Barre d'outils

La barre d'outils à gauche sous la fenêtre du diagramme permet de sélectionner les paramètres d'enregistrement des valeurs de mesure. Dans le champ « Sampling Rate », 5 taux d'échantillonnage

différents peuvent être sélectionnés. Le champ « Number of Points » propose 7 « largeurs de données » de 512 à 32768 points avec une durée d'enregistrement allant jusqu'à 19 heures. Le champ « Range » offre la possibilité de sélectionner parmi 6 échelles différents pour l'axe y. En activant l'option « Single Pass », l'« enregistrement des données » s'arrête après une exécution. Si cette option n'est pas activée, l'enregistrement des données se poursuit.

A gauche sous la barre d'outils se trouvent 8 boutons sur 2 rangées. Sur la rangée du haut à gauche se trouve le bouton « Examine Data ». Si ce bouton est sélectionné, un angle et la durée sont visibles dans la barre d'information. Si la croix disparaît, vous pouvez la faire réapparaître en cliquant sur ce bouton.

L'axe x ainsi que l'axe y peuvent être agrandis en activant le bouton +Zoom et en cliquant avec le bouton gauche de la souris dans la fenêtre active. Si le bouton -Zoom est activé et le bouton gauche de la souris actionné dans la fenêtre active, la taille d'origine est rétablie. L'agrandissement maximal est de 512 points dans le temps fois env. 1,5 mrad.

L'activation du bouton « Connect Data » permet de relier les points de mesure entre eux par une ligne.

A droite en dessous se trouvent les deux boutons « Select Points » et « Apply Corrections ». Avec le bouton « Select Points », 1, 2 ou 3 points peuvent être sélectionnés sur le graphique, afin de définir un décalage, une fonction linéaire ou une courbe quadratique. Ces derniers peuvent être utilisés pour corriger une déviation en cas de mesures de longue

durée. Des changements de l'humidité de l'air ont été démontrés comme la raison principale de telles déviations. Pour sélectionner des points, appuyer sur le bouton « Select Points » puis cliquer dans la fenêtre du diagramme et activer P1 dans le menu déroulant. Sélectionner ensuite le premier point pour la correction de la déviation. Répéter la procédure pour les deux points P2 et P3 suivants.

Pour effectuer la correction, appuyer sur le bouton « Apply Corrections ». Si la correction n'est pas satisfaisante, deux méthodes existent pour l'adaptation. Pour la première méthode, désactiver le bouton « Apply Corrections » en réappuyant dessus. Ensuite, sélectionner à nouveau des points et répéter la procédure complète. La deuxième méthode d'adaptation de la correction comprend la modification directe des coefficients de fonction. Pour cela, cliquer dans la fenêtre du diagramme et sélectionner « set coef. » dans le menu déroulant. Les nouvelles valeurs pour A, B et C peuvent à présent être entrées. Cliquer sur « OK » et cliquer une nouvelle fois dans la fenêtre du diagramme. Cliquer ensuite sur « Manual Coefficients OFF » pour démarrer la fonction « Manual Coefficients On » et voir la correction avec les valeurs saisies. Les coefficients peuvent être modifiés autant de fois qu'il le faut, jusqu'à ce que l'adaptation soit satisfaisante.

### 5.5 Filtre passe-bas

Le champ « LPF Time Constant » permet à l'utilisateur de choisir parmi 12 filtres passe-bas ou de n'en choisir aucun. Cette fonction est utilisée à titre exceptionnel. Toutes les expériences devraient être démarrées avec l'option « No LPF ». Si le renfort longitudinal intérieurement effectue des déplacements nettement différents des rotations, la réjection en mode commun empêche l'enregistrement de ces déplacements. Si cela ne doit pas être le cas, l'utilisation du filtre passe-bas peut être utile.

### 5.6 Bouton « Reset »

Après une série de mesures, les paramètres d'enregistrement des valeurs de mesure tels que le taux d'échantillonnage, le nombre de points de mesure, le mode de mesure, etc. peuvent être modifiés. En cliquant sur le bouton « Reset », ces modifications sont activées.

### 5.7 Bouton « Record »

Appuyer sur le bouton « Record » permet de démarrer une série de mesures. Le bouton devient maintenant le bouton « Stop » avec lequel la série de mesures peut être arrêtée manuellement. A la fin d'une série de mesures, qu'elle soit manuelle ou automatique, un message s'affiche, demandant si les données doivent être enregistrées.

### 5.8 Enregistrement et chargement

Les données sont enregistrées en cliquant sur le bouton « Save ». Le format standard est \*.cav. Deux autres formats (\*.txt et \*.xls) sont disponibles pour une analyse ultérieure des données dans un tableur.

Le bouton « Load » permet de charger des données enregistrées auparavant.

Le programme crée un fichier *temp.cav* après 2 minutes de saisie des données. La mesure est ensuite enregistrée dans ce fichier temporaire, de sorte que les données ne soient pas perdues par exemple en cas de coupure de courant, et puissent être récupérées. Ce fichier est écrasé lorsqu'une nouvelle série de mesures est démarrée.

### 5.9 Impression

Si le bouton « Print » est sélectionné, les données peuvent être imprimées. En plus du graphique, la vitesse d'enregistrement, le nombre de points de mesure et le nom du fichier sont imprimés. Les commentaires du champ Commentaires peuvent également être imprimés si cette option est sélectionnée.

### 5.10 Bouton « Setup »

Grâce à ce bouton, les limites Min./Max. de la plage de mesure de la balance sont définies.

« Y minimum » et « Y maximum » définissent la plage totale de la balance. Si ces valeurs sont modifiées, la lecture de la balance peut être adaptée. Les boutons « Adjust left border » et « Adjust right border » s'adaptent à l'affichage, de sorte que la position du renfort longitudinal corresponde au bord supérieur (adjust right border) ou inférieur (adjust left border) de la fenêtre du diagramme.

### 5.11 Etalonnage du point zéro

Le bouton situé directement à droite du bouton « Reset » définit le point zéro du renfort longitudinal. Le point zéro de l'oscillation du renfort longitudinal se trouve au point auquel le bouton a été actionné. Pour définir le point zéro, le renfort longitudinal est positionné au centre des platines de capteur, fixé temporairement à l'aide de la tige de centrage puis le bouton est enfoncé. Le centre géométrique des platines est ainsi défini comme le point zéro et la déviation par rapport à cette ligne des deux côtés est indiquée en mrad.

### 5.12 Bouton « Exit »

Le programme se ferme si le bouton « Exit » est actionné.