

1002656 Pendule balistique

Instructions d'utilisation

12/15 MH

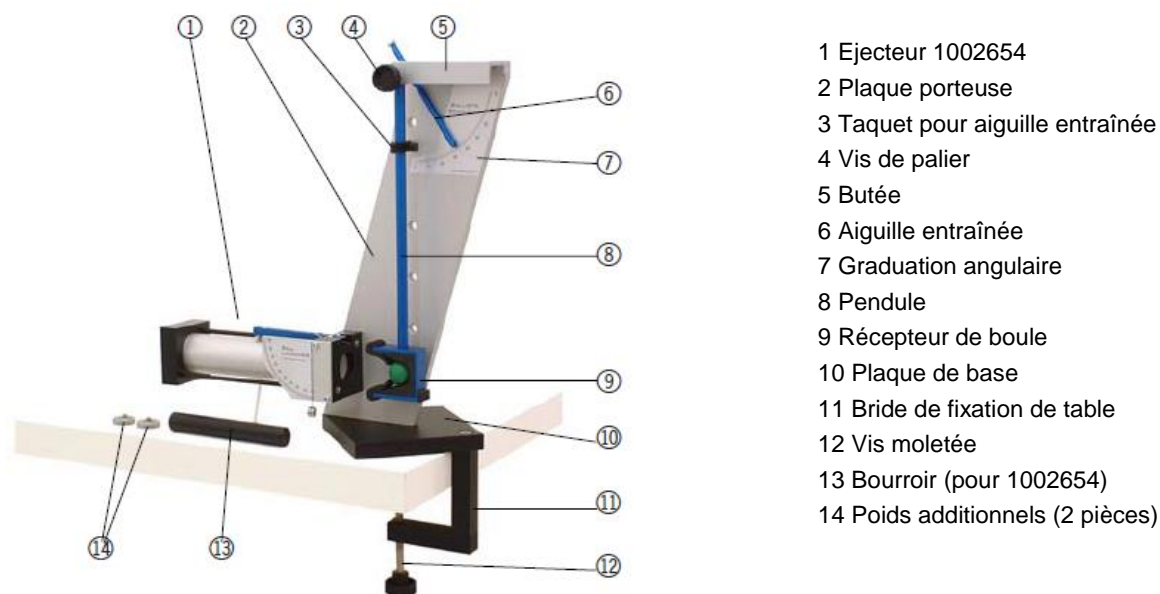


Fig.1: Composants

1. Consignes de sécurité

- Ce manuel d'utilisation décrit essentiellement le pendule balistique. On tiendra également compte du manuel de l'éjecteur 1002654.
- Pour vérifier si une boule se trouve dans l'éjecteur et que le ressort est tendu, se servir uniquement des trous d'observation latéraux. Il est interdit de regarder dans la bouche par l'avant. Risque de blessure!
- Ne jamais viser sur des gens!
- Pendant les expériences, porter des lunettes de protection.
- Avant de ranger l'éjecteur, détendre toujours le ressort et retirer les billes de la rampe.

2. Description

Le pendule balistique permet de déterminer par l'expérience la vitesse d'éjection de la boule lorsqu'elle sort de l'éjecteur. Par ailleurs, il permet également de déterminer les paraboles de l'éjection horizontale ou inclinée, des hauteurs d'éjection de 5, 10, 15, 20 et 30 cm pouvant être ajustées aisément à l'aide d'alésages prédéfinis. Grâce à l'extrême légèreté du pendule, les expériences peuvent être réalisées avec des boules en plastique relativement inoffensives, à la place de boules en acier. On peut évaluer les expériences tant sur le jet plastique (quantitatif) qu'élastique (qualitatif). Les vitesses déduites des expériences coïncident à $\pm 3\%$ avec les résultats obtenus habituellement. En utilisant des poids additionnels, on peut étudier différentes déviations du pendule à vitesse de boule constante.

3. Manipulation et entretien

- Tout d'abord, visser le pendule balistique à une plaque de travail stable à l'aide de la bride de fixation. Puis, introduire l'éjecteur soit horizontalement devant le pendule (cf. Fig. 1), soit par derrière dans la plaque porteuse (2) (cf. Fig. 3).

Conseil: si la plaque de travail n'est pas assez stable, il arrive que le retour du pendule, après la déviation maximale de ce dernier, entraîne un à-coup dû à l'impact contre l'éjecteur, dérégulant ainsi l'aiguille entraînée. Dans ce cas, rattraper le pendule avec la main.

- Avant de charger une boule dans l'éjecteur, vérifier toujours que le ressort est détendu. Puis, placer une boule dans la partie avant du cylindre intérieur en plastique. Pousser la boule avec le bourroir dans la rampe, jusqu'à ce que la tension désirée du ressort soit obtenue. Ne pas retirer le bourroir trop rapidement, l'aspiration qui en résulterait risquant sinon d'entraîner la boule. Contrôler la position de la boule uniquement à travers les trous latéraux. Ne jamais regarder dans la rampe!
- Avant l'éjection, vérifier que personne ne se trouve sur la trajectoire de la boule. Puis, tirer brièvement sur le cordon du levier de détente, en veillant à tirer à peu près perpendiculairement au levier.
- On peut démonter le pendule (8) en desserrant la vis de palier (4) et l'assembler de nouveau tourné à 180°, avec la face arrière du récepteur de boule (9) orienté vers l'éjecteur (expériences sur le jet élastique). La butée (5) est conçue de telle sorte qu'il suffit de ne serrer que très légèrement la vis de palier pour incliner un peu le pendule, le récepteur de boule ne se trouve alors plus exactement devant la bouche de l'éjecteur. Aussi faut-il serrer la vis de palier, jusqu'à ce que le récepteur de boule soit aligné à la bouche.
- Après avoir tourné le pendule ou si cela s'avère nécessaire, ajuster le taquet (3) de l'aiguille entraînée (6) de telle sorte qu'il vient juste toucher l'aiguille lorsque le pendule est stable. Ne tourner la vis du taquet qu'avec les doigts pour éviter des pressions dans la barre du pendule.
- **Entretien:** fondamentalement, le pendule balistique ne nécessite aucun entretien. Le cas échéant, verser un peu de graisse sans acide (vaseline) sur la vis de palier (4) et la vis moletée (12). Le cas échéant, il peut être nettoyé avec de l'acétone, de

l'éthanol ou de la ligoïne (sauf dans le domaine de la graduation). Eviter de le plonger dans de l'eau.

4. Réalisation et évaluation des expériences

4.1 Pendule balistique

4.1.1. Montage de l'expérience

- Le montage de l'expérience correspond à la figure 1 des expériences sur le jet élastique. Pour réaliser des expériences sur le jet élastique, tourner le pendule à 180° (cf. paragraphe 3 « Manipulation »).

4.1.2. Réalisation de l'expérience

- Au cours des expériences, il est conseillé de noter le numéro de l'expérience, la tension du ressort (1, 2 ou 3), le type de jet (plastique « p » ou élastique « e »), le nombre de poids additionnels utilisés ainsi que la mesure angulaire φ . Pour obtenir des résultats aussi précis que possible, répéter le lancement, l'aiguille entraînée ne devant pas être remis à 0°. On minimise ainsi les pertes inévitables dues au frottement de l'aiguille. Exemple d'une série d'expériences:

N°	Tension de ressort	Type de jet	Poids additionnels	Angle φ
1	1	p	0	17,5
2	2	p	0	25,0
3	3	p	0	36,0
4	1	p	2	9,5
5	2	p	2	13,5
6	3	p	2	19,0
7	1	e	0	29,5
8	2	e	0	42,0
9	3	e	0	60,0

4.1.3. Evaluation de l'expérience

4.1.3.1 Jet plastique

Pour le pendule oscillant, le principe sur la conservation de l'énergie se présente sous la forme

$$E_{\text{pot}} = E_{\text{cin}} \quad (1)$$

l'équation

$$E_{\text{pot}} = m_{\text{tot}} \cdot g \cdot \Delta h \quad (2)$$

s'appliquant à l'énergie potentielle. Dans cet exemple, m_{tot} représente la masse totale du pendule avec la boule et les éventuels poids additionnels, g l'accélération de la pesanteur et Δh la différence de hauteur du centre de gravité du pendule entre la position au repos et la déviation maximale.

Avec l'angle φ mesuré et le centre de gravité mesuré l_s , selon la figure 2, on obtient:

$$\Delta h = l_s \cdot (1 - \cos \varphi) \quad (3)$$

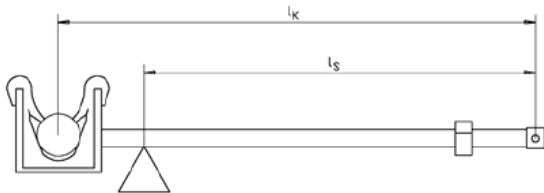


Fig. 2: Grandeurs nécessaires à l'évaluation. L'écart entre le centre de gravité et le point d'appui (l_s) doit être mesuré lors du jet plastique avec la boule et les poids additionnels. Le pendule peut être contrebalancé par exemple sur une règle placée de chant. L'écart entre le centre de la boule et le point d'appui s'élève à $l_k = 280$ mm.

L'énergie cinétique est calculée avec le couple d'inertie I_{tot} par rapport au point d'appui du pendule et la vitesse angulaire maximale ω d'après:

$$E_{\text{cin}} = \frac{1}{2} \cdot I_{\text{tot}} \cdot \omega^2 \quad (4)$$

Si les équations 2 et 4 sont utilisées dans l'équation 1 et que Δh est éliminé par l'équation 3, on obtient:

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot m_{\text{tot}} \cdot g \cdot l_s \cdot (1 - \cos \varphi)}{I_{\text{tot}}}} \quad (5)$$

Or, on ne recherche pas ω , mais la vitesse initiale de la boule v_0 . Le rapport entre les deux

grandeurs résulte du principe de conservation du moment angulaire (moment cinétique) directement avant et après le jet:

$$L_K = L_{\text{tot}} \quad (6)$$

avec le moment cinétique de la boule

$$L_K = m_K \cdot l_K \cdot v_0 \quad (7)$$

avant le jet et le moment cinétique total

$$L_{\text{tot}} = I_{\text{tot}} \cdot \omega \quad (8)$$

après le jet. En utilisant les équations 7 et 8 dans l'équation 6, on obtient

$$m_K \cdot l_K \cdot v_0 = I_{\text{tot}} \cdot \omega \quad (9)$$

Après la résolution de ω et l'égalisation avec l'équation 5, on obtient le rapport recherché

$$v_0 = \frac{1}{m_K \cdot l_K} \cdot \sqrt{2 I_{\text{tot}} m_{\text{tot}} g l_s (1 - \cos \varphi)} \quad (10)$$

Fondamentalement, le moment d'inertie doit être déterminé avec équation

$$I_{\text{tot}} = \int_m r^2 dm \quad (11)$$

r étant l'écart entre un élément de masse dm et le point d'appui. Comme il ne s'agit pas ici de déterminer des moments d'inertie, I_{tot} peut être calculé à partir de la durée d'oscillation T du pendule (avec la boule et d'éventuels poids additionnels). Pour un pendule physique et de petites déviations¹, on a:

$$I_{\text{tot}} = m_{\text{tot}} g l_s \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \quad (12)$$

A présent, toutes les grandeurs sont connues ou peuvent être calculées. Pour l'exemple ci-dessus avec $m_K = 0,00695$ on obtient:

N°	m_{tot} en kg	l_s en m	T en s	v_0 en m/s
1	0,06295	0,218	1,01	3,39
2	0,06295	0,218	1,01	4,82
3	0,06295	0,218	1,01	6,88
4	0,09795	0,252	1,07	3,51
5	0,09795	0,252	1,07	4,98
6	0,09795	0,252	1,07	6,99

Les valeurs doivent être déterminées individuellement pour chaque pendule, car les tolérances de matière et de fabrication peuvent entraîner des écarts.

4.1.3.2 Jet élastique

L'équation 5 s'applique toujours au pendule oscillant après le jet, à la différence près qu'il faut tenir compte du moment d'inertie du pendule sans la boule I_p , mais éventuellement avec des poids additionnels (masse de pendule m_p):

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot m_p \cdot g \cdot I_s \cdot (1 - \cos \varphi)}{I_p}} \quad (13)$$

Pour déterminer le rapport entre ω et la vitesse initiale v_0 , nous disposons maintenant tant du taux de conservation du moment cinétique que du taux de conservation de l'énergie, à chaque fois avant et après le jet. La suite de l'équation est également utile, car le système présente un autre degré de liberté: la vitesse de la boule v_2 après le jet. Par analogie à l'équation 9, on obtient pour les moments angulaires:

$$m_k \cdot l_k \cdot v_0 = m_k \cdot l_k \cdot v_2 + I_p \cdot \omega$$

$$\Leftrightarrow \quad (14)$$

$$v_2 = v_0 - \frac{I_p \cdot \omega}{m_k \cdot l_k}$$

Si cette vitesse v_2 est utilisée dans le principe de conservation de l'énergie

$$\frac{1}{2} m_k \cdot v_0^2 = \frac{1}{2} m_k \cdot v_2^2 + \frac{1}{2} I_p \cdot \omega^2 \quad (15)$$

on obtient après quelques transformations v_0 :

$$v_0 = \frac{1}{2} \omega l_k \left(1 + \frac{I_p}{m_k l_k^2} \right) \quad (16)$$

Si l'on utilise en plus l'équation 13 et qu'on détermine I_p par analogie à l'équation 12, v_0 peut être calculé pour un jet entièrement élastique. Avec $m_k = 0,00695 \text{ kg}$:

N°	m_p en kg	I_s en m	T en s	v_0 en m/s
7	0,056	0,211	1,008	2,88
8	0,056	0,211	1,008	4,05
9	0,056	0,211	1,008	5,65

Ces valeurs pour v_0 sont env. 18% inférieures à celles qui sont déterminées par le jet plastique, ce qui permet de conclure que le jet n'a pas été entièrement élastique.

4.2 Détermination de paraboles d'éjection

4.2.1. Montage de l'expérience

Un montage possible de l'expérience est représenté schématiquement dans la figure 3 (l'échelle n'est pas tout à fait exacte). Les trous dans la plaque porteuse du pendule sont disposés de telle sorte qu'un jet directement sur la plaque de travail donne les hauteurs d'éjection 50, 100, 150, 200 et 300 mm.

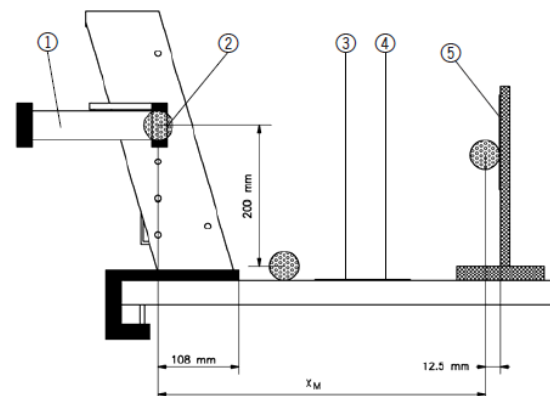


Fig. 3 Montage de l'expérience, légende: (1) éjecteur, (2) position de lancement de la boule, (3) papier, (4) papier carbone, (5) par ex. tableau blanc avec support

En cas d'éjection contre un mur vertical, déduire le rayon de la boule (1,25 cm) de l'écart horizontal entre le point d'éjection et le mur, pour obtenir la distance x_M . La hauteur y_M par rapport à la hauteur de lancement résulte de l'écart entre le point d'impact au mur et la plaque de la table, moins 62,5 mm, 112,5 mm, 162,5 mm, 212,5 mm ou 312,5 mm, selon le trou utilisé.

4.2.2. Réalisation de l'expérience

Lors des expériences, il est conseillé de noter le numéro de l'expérience, la tension du ressort (1, 2 ou 3), l'angle d'éjection ainsi que les valeurs x_M et y_M . Exemple avec l'angle d'éjection lancio $\varphi = 0^\circ$:

N°	Tension de ressort	Portée x_M en cm	Hauteur cible y_M en cm
1	1	171,3	-30
2	2	125,4	-30
3	3	86,9	-30
4	1	62,3	-15
5	2	90,5	-15
6	3	120,7	-15

4.1.3. Evaluation de l'expérience

Pour des raisons pratiques, la source des coordonnées est placée au centre de la boule au moment de l'éjection. On a alors les équations suivantes:

$$v_x = v_0 \cos \varphi \quad (17)$$

$$v_y = v_0 \sin \varphi \quad (18)$$

$$y = v_y t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (19)$$

$$x = v_x t \quad (20)$$

De l'équation 20, il résulte directement $t = x / v_x$, le temps dans l'équation 19 pouvant être éliminé.

Si l'on élimine encore dans l'équation ainsi obtenue les grandeurs v_x et v_y en utilisant les équations 17 et 18, on obtient avec

$$y = x \tan \varphi - x^2 \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \varphi} \quad (21)$$

l'équation de la parabole d'éjection.

Dans cette équation, seule est encore inconnue la vitesse initiale v_0 , car les parcours x et y ont été mesurés au cours des expériences. Si l'on détermine v_0 pour les différentes expériences, on obtient:

Tension de ressort	v_0 en m/s
1	3,53
2	5,10
3	6,85

Ces valeurs reposent sur un total de 25 expériences, dont six seulement sont indiquées dans le tableau ci-dessus. Ces valeurs permettent maintenant de calculer des paraboles d'éjection d'après l'équation 21 et de les comparer aux valeurs mesurées. Le résultat est illustré dans la figure 4.

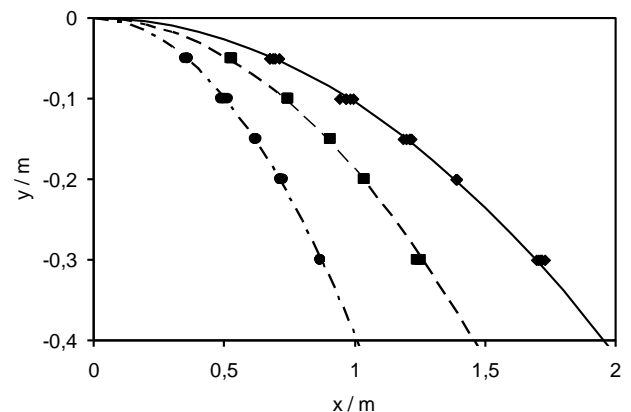


Fig. 4 Valeurs mesurées et calcul comparatif, x = portée, y = hauteur, symboles, valeurs mesurées (cercles = tension de ressort 1, carrés = tension de ressort 2, losanges = tension de ressort 3), lignes = paraboles calculées