3B Scientific

EXPERIENCES DE PHYSIQUE

3bscientific.com

Mécanique · Thermodynamique · Thermodynamique · Optique · Physique atomique et nucléaire · Physique des solides · Énergie et environnement

Cher client,

Connaissez-vous notre catalogue 3B Scientific® avec ses plus de 110 expériences ? Toujours actuel, il offre un choix fascinant d'expériences. Ce recueil couvre toute l'étendue des cours, de la physique classique à la physique moderne. Nous sommes heureux de vous présenter 20 nouvelles expériences. Nous aimerions souligner en particulier les expériences sur

- les déformations élastiques de corps solides (module d'élasticité et module de cisaillement)
- la propagation du son dans des baguettes
- l'étude de l'effet Pockels
- la détermination de la charge élémentaire selon Millikan
- l'installation et l'optimisation des installations photovoltaïques

Si vous nécessitez une composition d'appareils pour d'autres thèmes, nous les mettons volontiers à votre disposition pour répondre à vos demandes spécifiques. Vous pouvez nous joindre par téléphone, courriel et notre site Internet sur 3bscientific.com. Merci par avance pour toutes vos remarques, questions et commandes.

Toutes les expériences sont également disponibles au format PDF et peuvent être téléchargées sur notre site Internet. Vous y trouverez aussi de nouvelles compositions.

Spectromètre à prisme, page 32

Qualité oblige

3B Scientific vous offre des produits de grande qualité à des prix très avantageux. Le haut niveau de notre gestion de la qualité correspond aux standards de la norme ISO 9001 et de la Worlddidac Quality Charter, il est régulièrement confirmé par des experts indépendants.

Vous pouvez nous faire confiance

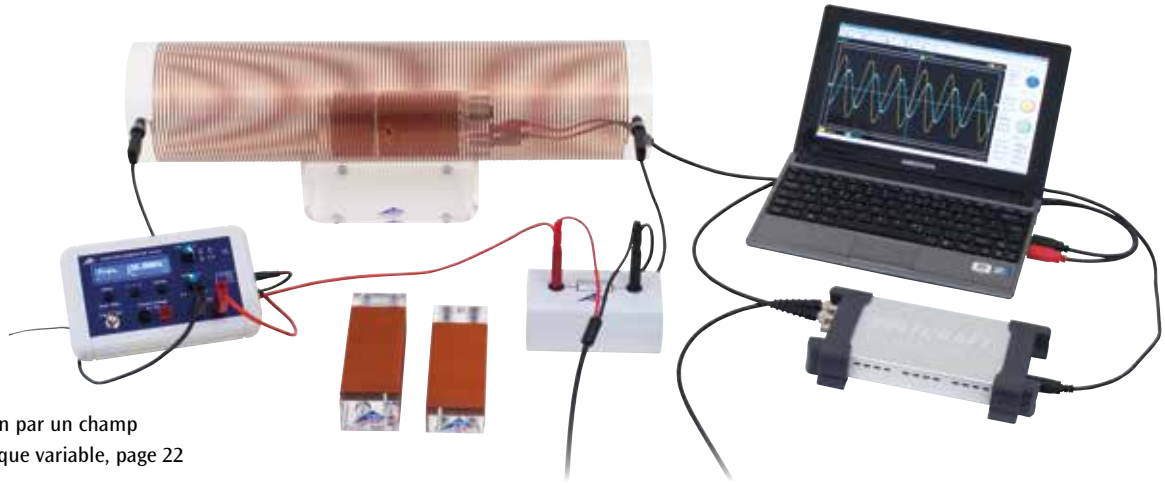
LEGENDE

1 → Expérience de base

2 → Expérience avancée

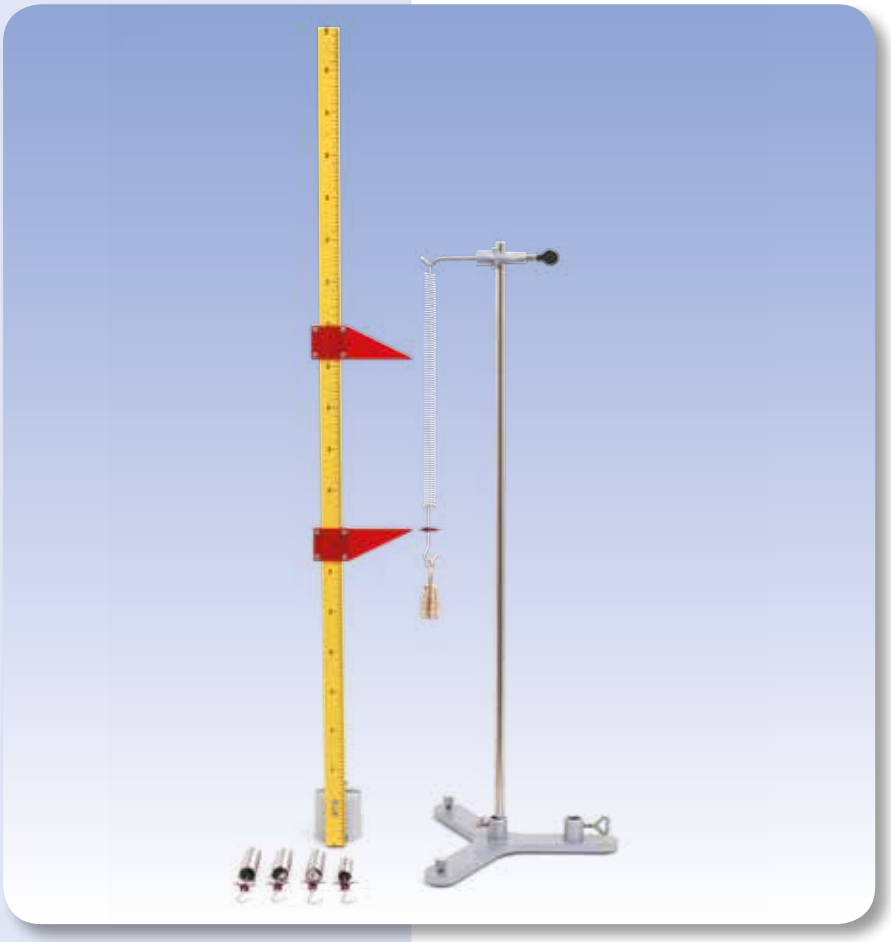
Recherchez d'autres expériences à 3bscientific.com

SOMMAIRE



Induction par un champ magnétique variable, page 22

UE1020100 LOI DE HOOKE



OBJECTIF

Confirmer la loi de Hooke pour les ressorts hélicoïdaux de traction

EXERCICES

- **Confirmer la loi de Hooke et déterminer la constante de ressort pour cinq ressorts hélicoïdaux différents**
- **Comparer les constantes de ressort mesurées aux constantes de ressort calculées**

RESUME

Dans un corps élastique, l'extension et la tension sont proportionnelles l'une par rapport à l'autre. Cette relation découverte par *Robert Hooke* est souvent étudiée sur un ressort hélicoïdal auquel est attaché un poids. La modification de longueur du ressort hélicoïdal est proportionnelle au poids accroché *F*. Dans l'expérience, on mesure cinq ressorts hélicoïdaux différents dont les constantes de ressort se distinguent au total par un ordre de grandeur grâce au choix approprié du diamètre de fil et du diamètre de spire. Dans tous les cas, la validité de la loi de Hooke pour des forces au-delà de la précontrainte est confirmée.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Jeu de 5 ressorts cylindriques (Loi de Hooke)	**1003376**
1	Jeu de masses à fente 20 – 100 g	**1003226**
1	Règle graduée verticale, 1 m	**1000743**
1	Jeu d'indices pour règle graduée	**1006494**
1	Socle de serrage, 1000 g	**1002834**
1	Tige statif, 1000 mm	**1002936**
1	Socle pour statif, trépied, 150 mm	**1002835**
1	Noix de serrage avec crochet	**1002828**
En plus recommandé		
1	Pied à coulisse, 150 mm	**1002601**
1	Micromètre 0-25 mm	**1002600**

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

1

GENERALITES

Dans un corps élastique, l'extension et la tension sont proportionnelles l'une par rapport à l'autre. Découverte par *Robert Hooke*, cette relation décrit bien le comportement de nombreux matériaux en cas de déformation suffisamment petite. Aux fins d'illustration, sa loi est souvent étudiée à l'aide d'un ressort hélicoïdal auquel on a fixé un poids. La modification de longueur du ressort hélicoïdal est proportionnelle au poids suspendu *F*.

Il faut tenir compte précisément de la précontrainte que peut présenter le ressort hélicoïdal selon le processus de fabrication. Elle doit être compensée par un poids F_1 qui étend le ressort de longueur hors charge s_0 à la longueur s_1. Pour les poids supérieurs à F_1, la loi de Hooke s'applique sous la forme

(1) $$F - F_1 = k \cdot (s - s_1),$$

tant que la longueur s du ressort étiré n'est pas trop grande.

La constante de ressort k dépend du matériau et des dimensions géométriques. Pour un ressort hélicoïdal cylindrique à n spires de diamètre constant D, on a

(2) $$k = G \cdot \frac{d^4}{D^3} \cdot \frac{1}{8 \cdot n}.$$

d : diamètre du fil à ressort

Le module de cisaillement G pour les fils d'acier s'élève à 81,5 GPa.

Dans l'expérience, on mesure cinq ressorts hélicoïdaux différents dont les constantes de ressort se distinguent par un ordre de grandeur grâce au choix approprié du diamètre de fil et du diamètre de spire. Dans tous les cas, la validité de la loi de Hooke pour des forces au-delà de la précontrainte est confirmée.

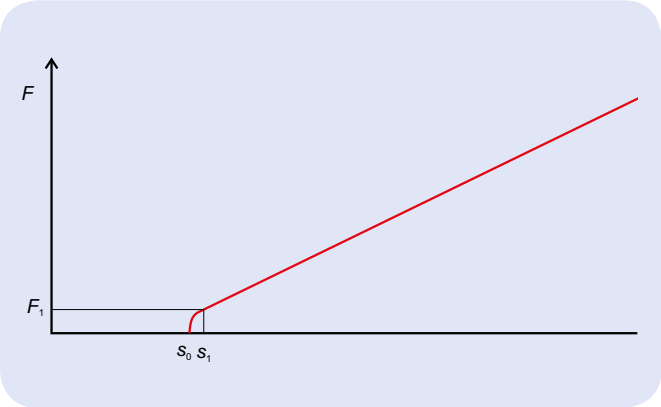


Fig. 1 : Caractéristique schématique d'un ressort hélicoïdal de traction de longueur s avec précontrainte

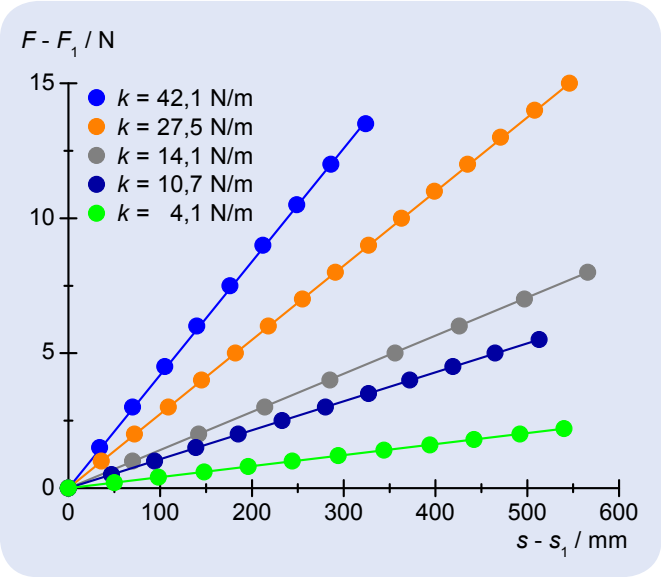


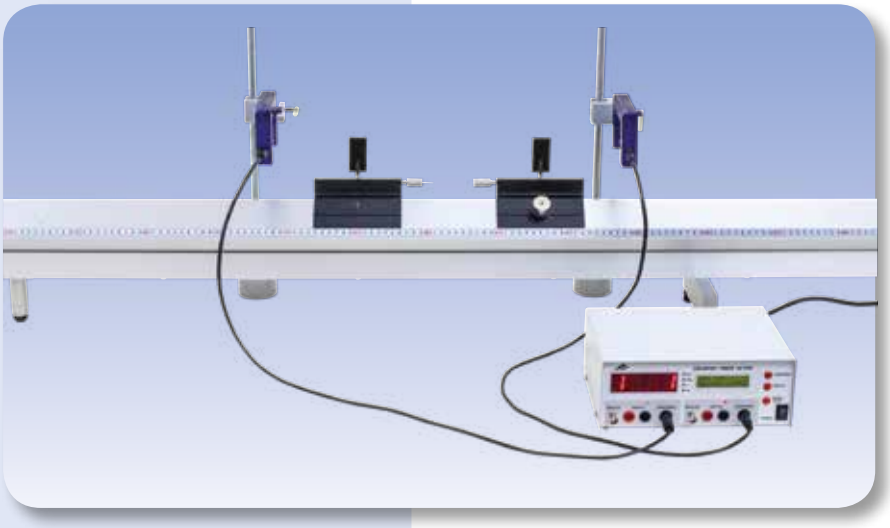
Fig. 2 : Charge comme fonction de la modification de longueur

EVALUATION

La force de poids F est calculée avec suffisamment de précision à partir de la masse suspendue m selon l'équation

$$F = m \cdot 10 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$$

UE1030280 LOIS DE COLLISION



OBJECTIF

Étude de collisions unidimensionnelles sur le banc à coussin d'air

RESUME

La conservation d'impulsion résultant de la collision de deux corps constitue une conséquence importante du troisième axiome de Newton. On peut la vérifier par ex. en étudiant les collisions unidimensionnelles de deux patins sur un banc à coussin d'air. On parle de collisions élastiques lorsque toute l'énergie cinétique est conservée, et de collisions inélastiques lorsque seule l'énergie cinétique du centre de gravité commun est conservée. Dans l'expérience, les différentes vitesses des patins sont déterminées à partir des durées d'interruption à hauteur d'une barrière lumineuse, qui permettent alors de calculer les impulsions.

EXERCICES

- **Étudier la collision élastique et inélastique de deux patins sur le banc à coussin d'air.**
- **Démontrer la conservation d'impulsion en cas de collision élastique et inélastique et observer les impulsions individuelles en cas de collision élastique.**
- **Étudier les bilans énergétiques en cas de collision élastique et inélastique.**

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Banc à coussin d'air	**1019299**
1	Soufflerie (230 V, 50/60 Hz)	**1000606 ou**
	Soufflerie (115 V, 50/60 Hz)	**1000605**
1	Compteur numérique à interface (230 V, 50/60 Hz)	**1003123 ou**
	Compteur numérique à interface (115 V, 50/60 Hz)	**1003122**
2	Barrière photoélectrique	**1000563**
2	Socle de serrage, 1000 g	**1002834**
2	Noix universelle	**1002830**
2	Tige statif, 470 mm	**1002934**
Equipements complémentaires recommandés		
1	Balance pour laboratoires 610	**1003419**

GENERALITES

La conservation d'impulsion résultant de la collision de deux corps constitue une conséquence importante du troisième axiome de Newton. On peut la vérifier par ex. en étudiant les collisions unidimensionnelles de deux patins sur un banc à coussin d'air.

Dans le référentiel du centre de gravité commun, l'impulsion totale des deux patins des masses m_1 et m_2 est nulle avant et après la collision.

(1) $$\tilde{p}_1 + \tilde{p}_2 = \tilde{p}_1' + \tilde{p}_2' = 0$$

$\tilde{p}_1$, $\tilde{p}_2$: impulsions individuelles avant la collision, $\tilde{p}_1'$, $\tilde{p}_2'$: impulsions individuelles après la collision.

Selon le type de collision, l'énergie cinétique des deux patins dans ce référentiel

(2) $$\tilde{E} = \frac{\tilde{p}_1^2}{2m_1} + \frac{\tilde{p}_2^2}{2m_2}$$

peut être transformée partiellement ou complètement en d'autres formes d'énergie. On parle de collision élastique lorsque l'énergie cinétique dans le système barycentrique est conservée dans son intégralité, et de collision inélastique lorsqu'elle est transformée complètement.

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

1

Dans le référentiel du banc, la conservation d'impulsion est

(3) $$p_1 + p_2 = p_1' + p_2' = p = \text{const.}$$

p_1, p_2 : impulsions individuelles avant la collision,
p'_1, p'_2 : impulsions individuelles après la collision.

En conséquence de la conservation d'impulsion, la vitesse

(4) $$v_C = \frac{p}{m_1 + m_2}.$$

et l'énergie cinétique

(5) $$E_C = \frac{m_1 + m_2}{2} \cdot v_C^2.$$

du centre de gravité sont conservées. Ceci s'applique tant aux collisions élastiques qu'inélastiques.
Dans l'expérience, le second patin est au repos avant la collision. C'est pourquoi la conservation d'impulsion (équation 3) est la suivante :

(6) $$p = m_1 \cdot v_1 = m_1 \cdot v_1' + m_2 \cdot v_2',$$

v'_1 et v'_2 prenant différentes valeurs après une collision élastique, mais coïncidant après une collision inélastique. En cas de collision élastique, un coulisseau plat du premier patin entre en collision avec un ruban en caoutchouc tendu du second patin ; en cas de collision inélastique, un coulisseau long et pointu s'accroche dans de la pâte à modeler. Pour varier la masse, on peut ajouter des masses supplémentaires.
Après une collision élastique :

(7) $$p_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \cdot p,\ p_2' = \frac{2 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot p$$

et

(8) $$E = \frac{m_1}{2} \cdot v_1^2 = \frac{m_1}{2} \cdot v_1'^2 + \frac{m_2}{2} \cdot v_2'^2.$$

En cas de collision inélastique, seule est conservée l'énergie cinétique du centre de gravité. À partir de (4), (5) et (6), on calcule

(9) $$E_C = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot \frac{m_1}{2} \cdot v_1^2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot E.$$

EVALUATION

Les intervalles de temps Δt enregistrés dans le compteur numérique doivent être affectés aux différentes étapes du déroulement expérimental. Pour la vitesse des patins, on a

$$v = \frac{25\,\text{mm}}{\Delta t}$$

En l'absence de balance, on suppose un patin d'une masse de 204 g, toutes les masses supplémentaires représentent en tout 200 g.
Si l'on étudie de plus près le bilan énergétique et des impulsions, il faut tenir compte également des pertes dues aux frottements. Sur les impulsions déterminées, elles représentent ≈ 5 % et pour les valeurs énergétiques 10 % (Fig. 1 à 5).

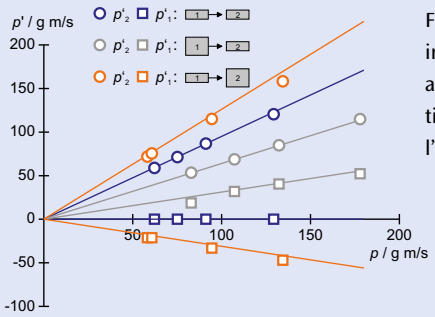


Fig. 1 : Impulsions individuelles des corps après la collision élastique en fonction de l'impulsion initiale.

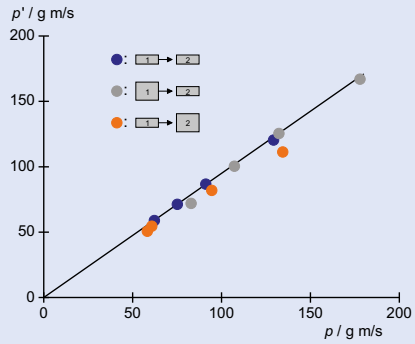


Fig. 2 : Impulsion totale des corps après la collision élastique en fonction de l'impulsion initiale.

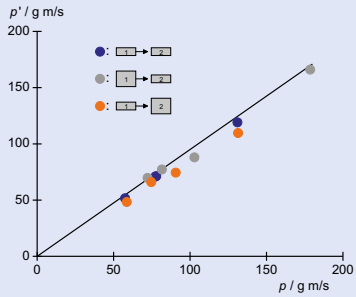


Fig. 3 : Impulsion totale des corps après la collision inélastique en fonction de l'impulsion initiale.

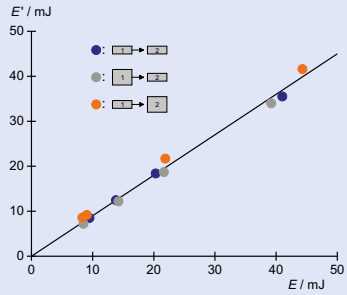


Fig. 4 : Énergie totale des corps après la collision élastique en fonction de l'énergie initiale.

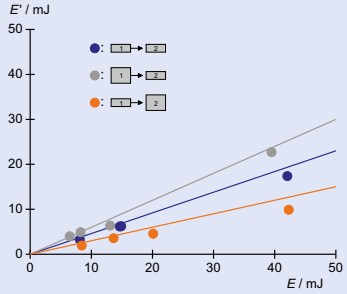
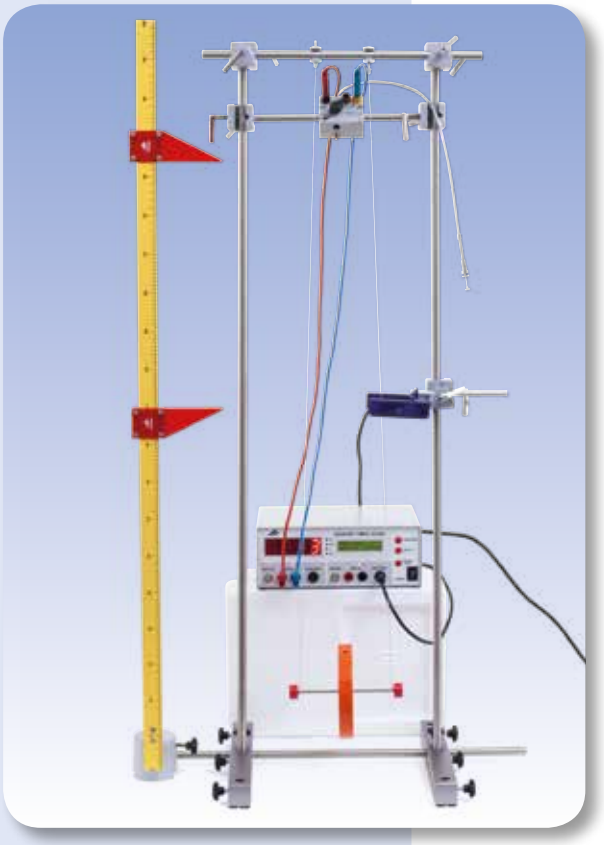


Fig. 5 : Énergie totale des corps après la collision inélastique en fonction de l'énergie initiale.

UE1040320 ROUE DE MAXWELL



OBJECTIF

Confirmation de la conservation de l'énergie à l'aide de la roue de Maxwell

RESUME

La roue de Maxwell est suspendue des deux côtés de son axe à un fil sur lequel elle monte et descend. De l'énergie potentielle est convertie en énergie cinétique, puis inversement. Les mouvements de montée et de descente se répètent, jusqu'à ce que l'énergie déterminée par la hauteur initiale soit complètement perdue par les pertes de frottement et de réflexion. Dans l'expérience, on dispose à différentes hauteurs une barrière lumineuse qui est interrompue à chaque fois par l'axe de la roue de Maxwell qui monte et qui descend. Les temps d'interruptions permettent de calculer les vitesses momentanées et ainsi les énergies cinétiques.

EXERCICES

- **Enregistrer le diagramme parcours/temps et le diagramme vitesse/temps du premier mouvement de descente.**
- **Déterminer l'accélération et le moment d'inertie.**
- **Déterminer les énergies cinétiques et potentielles pendant les mouvements de descente et de montée.**
- **Confirmer la conservation de l'énergie en tenant compte des pertes de frottement et de réflexion.**

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

1

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Roue de Maxwell	1000790
1	Dispositif de déclenchement pour la roue de Maxwell	1018075
1	Compteur numérique à interface (230 V, 50/60 Hz)	1003123 ou
	Compteur numérique à interface (115 V, 50/60 Hz)	1003122
1	Barrière photoélectrique	1000563
1	Pied en forme de H	1018874
2	Tige statif, 1000 mm	1002936
5	Noix universelle	1002830
1	Tige statif, 400 mm, 10 mm Ø	1012847
1	Paire de cordons de sécurité, 75 cm, rouge/bleu	1017718
En plus recommandé		
1	Balance électronique 5000 g	1003434
1	Pied à coulisse, 150 mm	1002601

GENERALITES

La roue de Maxwell est suspendue des deux côtés de son axe à un fil sur lequel elle peut monter et descendre. Toujours plus d'énergie potentielle est transformée en énergie cinétique de la rotation. Dès que le fil est entièrement déroulé, la roue continue à tourner avec une forte énergie de rotation, enroule le fil de l'autre côté et, sous l'effet de restitution d'énergie cinétique en énergie potentielle, remonte jusqu'à ce que l'énergie cinétique soit complètement reconvertie. Puis, le déroulement et l'enroulement se répètent, jusqu'à ce que l'énergie déterminée par la hauteur initiale soit complètement perdue par les pertes de frottement et de réflexion.

Lors du déroulement et de l'enroulement, la roue descend et monte lentement à vitesse v. Selon l'équation

(1) $$v = \omega \cdot r \text{ avec } r \text{ : rayon de l'axe}$$

la vitesse est en rapport direct avec la vitesse angulaire ω à laquelle la roue tourne sur son propre axe. Aussi, l'énergie totale s'élève à

(2) $$E = m \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$
$$= m \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{I}{m \cdot r^2} + 1 \right) \cdot v^2$$

m : masse, I : moment d'inertie, h : hauteur au-dessus du point d'inflexion, g : accélération de la pesanteur

Elle décrit un mouvement de translation avec l'accélération orientée vers le bas

(3) $$\dot{v} = a = \frac{g}{\frac{I}{m \cdot r^2} + 1}.$$

Dans l'expérience, cette accélération est déterminée à partir du parcours franchi pendant le temps t

(4) $$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

et de la vitesse momentanée atteinte après le temps t

(5) $$v = a \cdot t.$$

Pour cela, on dispose à différentes hauteurs h une barrière lumineuse qui est interrompue à chaque fois par l'axe de la roue qui monte et qui descend (Fig. 1). Un compteur numérique mesure les temps d'interruption Δt et le « temps de chute » t du premier mouvement de descente.

EVALUATION

La masse m et le rayon d'axe r étant connus, on détermine le moment d'inertie à partir de l'accélération a. En raison de (3) :

$$I = m \cdot r^2 \cdot \left(\frac{g}{a} - 1 \right).$$

Les temps d'interruption Δt permettent de calculer les vitesses momentanées v et les énergies cinétiques E_{kin} :

$$v = \frac{2 \cdot r}{\Delta t} \text{ et } E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{I}{m \cdot r^2} + 1 \right) \cdot v^2.$$

Pour l'énergie potentielle :

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h.$$

La supposition d'une force de frottement constante agissant dans le sens opposé au mouvement et la déperdition non négligeable d'énergie au changement de direction au point d'inflexion inférieur permettent de décrire les pertes clairement visibles dans la Fig. 4 du bilan énergétique.

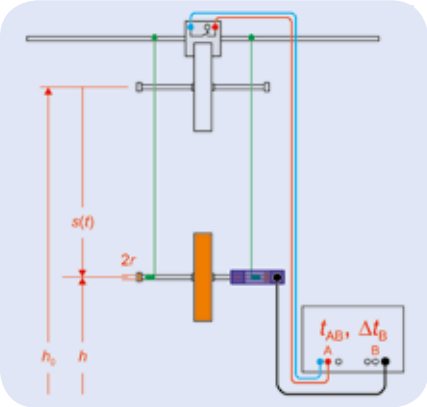


Fig. 1 : Représentation schématique du montage expérimental

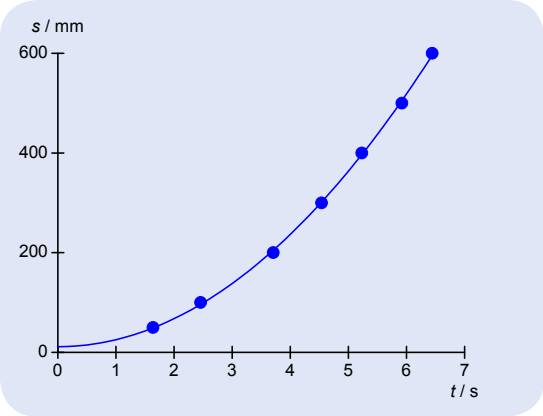


Fig. 2 : Diagramme parcours/temps du premier mouvement de descente

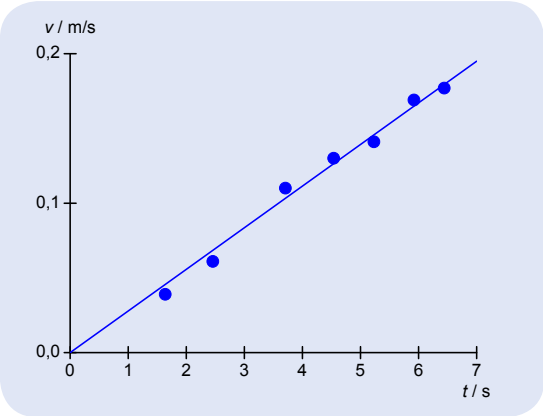


Fig. 3 : Diagramme vitesse/temps du premier mouvement de descente

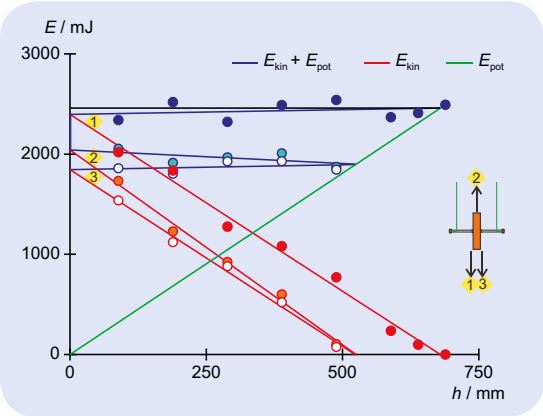
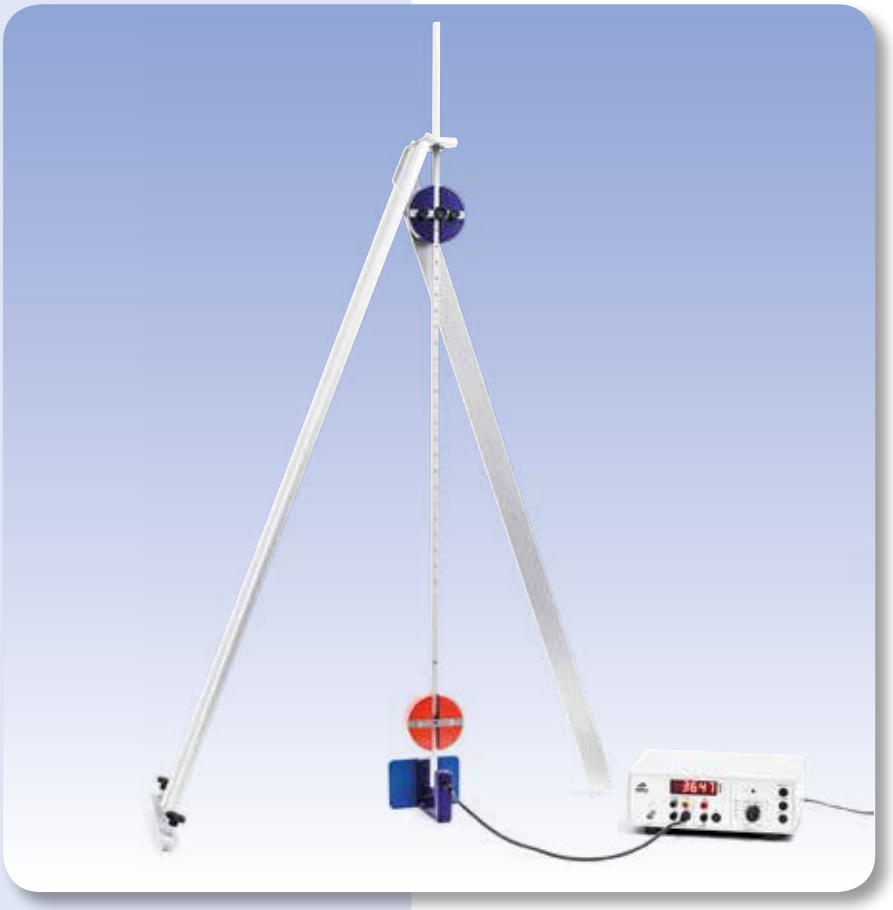


Fig. 4 : Bilan énergétique en fonction de la hauteur h

UE1050221 PENDULE REVERSIBLE DE KATER



OBJECTIF

Déterminer l'accélération locale de la pesanteur à l'aide d'un pendule de réversion

EXERCICES

- **Faire coïncider un pendule de réversion à durée d'oscillation identique sur deux suspensions.**
- **Déterminer la durée d'oscillation et calculer l'accélération locale de la pesanteur.**

RESUME

Le pendule de réversion représente une forme spéciale du pendule physique. Il oscille au choix sur deux suspensions et permet ainsi de déterminer si la durée d'oscillation est identique dans les deux cas. La longueur de pendule réduite coïncide alors avec l'écart des deux suspensions. Il est plus facile ainsi de déterminer l'accélération locale de la pesanteur à partir de la durée d'oscillation et la longueur de pendule réduite. La coïncidence du pendule de réversion est obtenue dans l'expérience par le décalage d'une masse entre les suspensions, tandis qu'une masse opposée un peu plus grande reste fixée à l'extérieur.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Pendule réversible de Kater	**1018466**
1	Barrière photoélectrique	**1000563**
1	Compteur numérique (230 V, 50/60 Hz)	**1001033 ou**
	Compteur numérique (115 V, 50/60 Hz)	**1001032**

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

1

GENERALITES

Le pendule de réversion représente une forme spéciale du pendule physique. Il oscille au choix sur deux suspensions et permet ainsi de déterminer si la durée d'oscillation est identique dans les deux cas. La longueur de pendule réduite coïncide alors avec l'écart des deux suspensions. Il est plus facile ainsi de déterminer l'accélération locale de la pesanteur à partir de la durée d'oscillation et la longueur de pendule réduite.

Lorsqu'un pendule physique oscille librement et à faibles déviations ϕ de sa position de repos, l'équation de mouvement est la suivante :

(1) $$\frac{J}{m\cdot s}\cdot\ddot{\varphi}+g\cdot\varphi=0.$$

J : moment d'inertie par rapport à l'axe d'oscillation,
g : accélération de la pesanteur,
m : masse pendulaire,
s : écart entre l'axe d'oscillation et le centre de gravité

La grandeur

(2) $$L=\frac{J}{m\cdot s}$$

est la longueur du pendule physique. Un pendule mathématique de cette longueur oscille avec la même durée d'oscillation.

Selon la loi de Steiner, l'équation pour le moment d'inertie est la suivante :

(3) $$J=J_s+m\cdot s^2.$$

J_S : moment d'inertie par rapport à l'axe du centre de gravité

Par conséquent, à un pendule de réversion avec deux suspensions dans un écart d, il faut assigner les deux longueurs de pendule réduites

(4) $$L_1=\frac{J_s}{m\cdot s}+s \quad \text{et} \quad L_2=\frac{J_S}{m\cdot(d-s)}+d-s$$

Elles coïncident lorsque le pendule de réversion oscille avec la même durée d'oscillation sur les deux suspensions. Dans ce cas,

(5) $$s=\frac{d}{2}\pm\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2-\frac{J_S}{m}}$$

et

(6) $$L_1=L_2=d.$$

Dans ce cas, la durée d'oscillation T s'élève à

(7) $$T=2\pi\cdot\sqrt{\frac{d}{g}}.$$

Dans l'expérience, on obtient la coïncidence du pendule de réversion en décalant une masse m_2 = 1 kg entre les suspensions, tandis qu'on fixe une masse opposée m_1 = 1,4 kg un peu plus grande à l'extérieur. La durée d'oscillation est mesurée par voie électronique, tandis que l'extrémité inférieure du pendule interrompt périodiquement une barrière lumineuse. Ainsi, les durées d'oscillation T_1 et T_2 assignées aux longueurs de pendule réduites L_1 et L_2 sont mesurées en fonction de la position x_2 de la masse m_2.

EVALUATION

Les deux courbes de mesure $T_1(x_2)$ et $T_2(x_2)$ se coupent deux fois à la valeur $T = T_1 = T_2$, la détermination exacte des points d'intersection nécessitant une interpolation entre les points de mesure. À partir de la valeur obtenue, on calcule

$$g=\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2\cdot d,\ d = 0{,}8\ \text{m}$$

avec une précision relative de 0,3 pour mille.

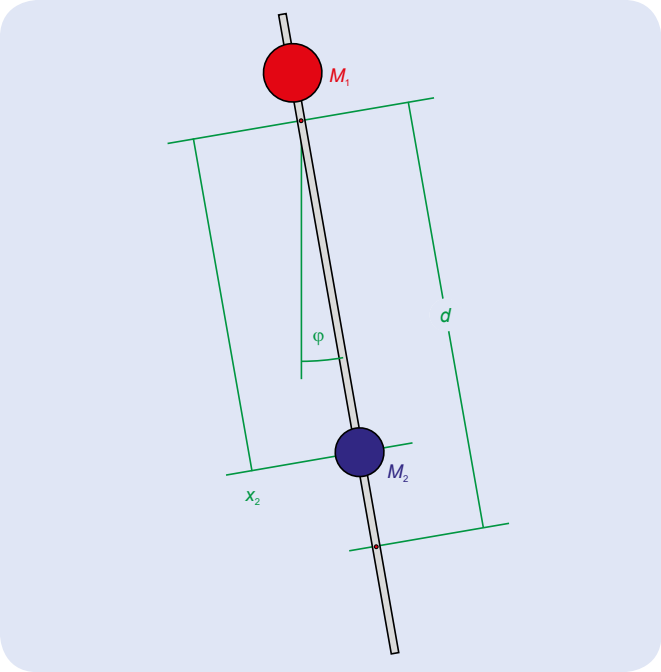


Fig. 1 : Représentation schématique du pendule de réversion

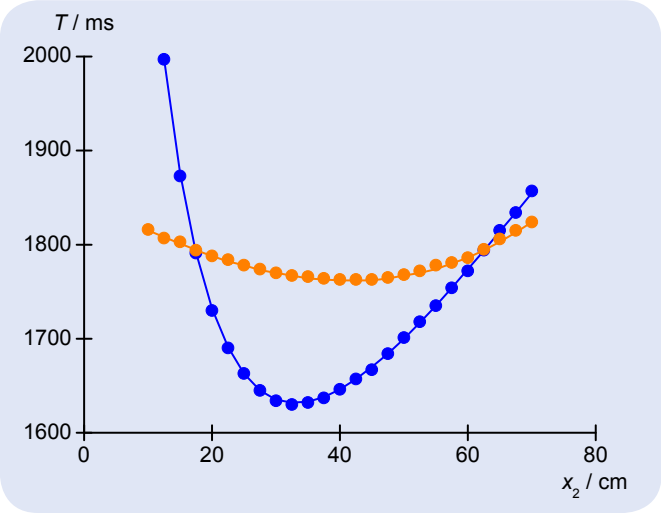
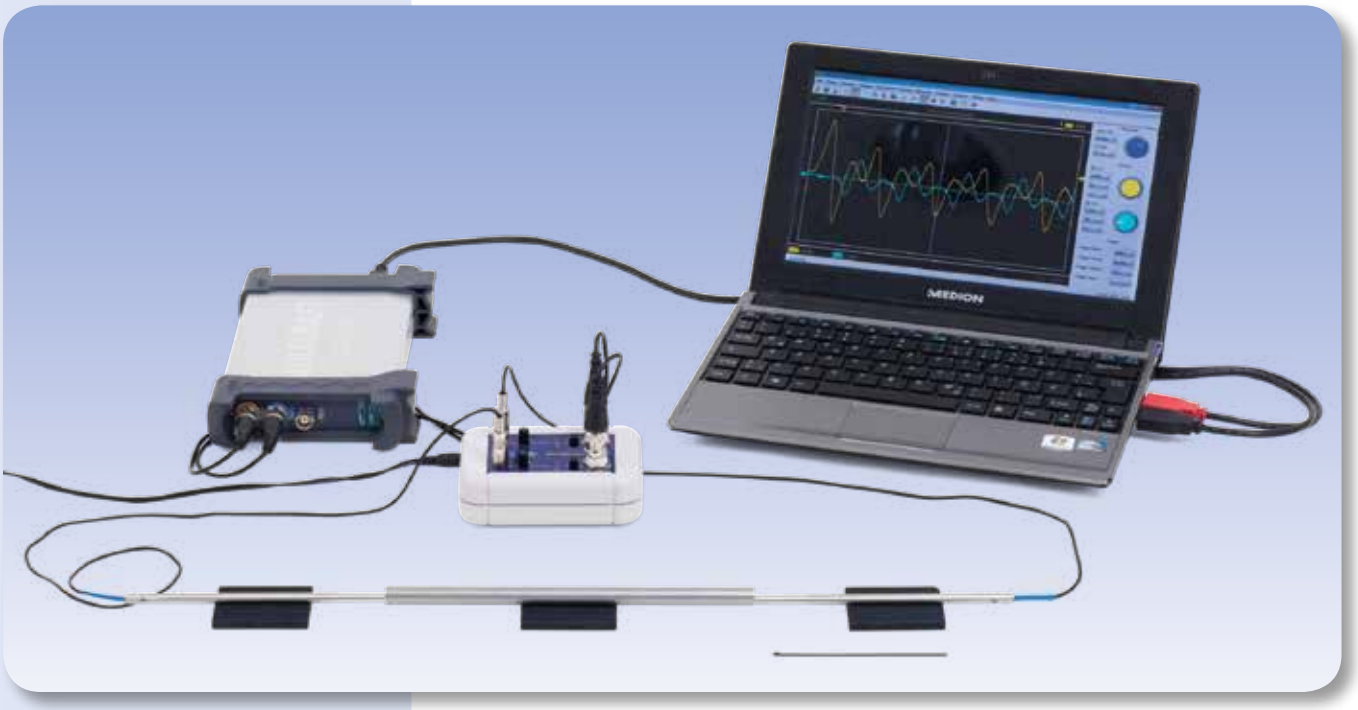


Fig. 2 : Durées d'oscillation mesurées T_1 et T_2 en fonction de de la position de la masse 2.

UE1070410 PROPAGATION DU SON DANS DES BAGUETTES



EXERCICES

- **Provoquer une excitation impulsionnelle d'ondes acoustiques longitudinales dans des baguettes et détecter les ondes avec deux sondes microphoniques**
- **Analyser avec un oscilloscope les impulsions acoustiques en fonction du matériau et de la longueur des baguettes**
- **Déterminer les vitesses du son longitudinales des matériaux à partir des durées des impulsions acoustiques**
- **Déterminer les modules d'élasticité des matériaux à partir des vitesses du son longitudinales et des densités**

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

2

OBJECTIF

Étude des ondes acoustiques longitudinales dans des baguettes rondes et détermination de la vitesse du son longitudinale

RESUME

Les ondes acoustiques peuvent se propager dans des corps solides sous la forme d'ondes longitudinales, transversales, de dilatation ou de flexion. Une onde longitudinale élastique est propagée dans une baguette par une séquence périodique de dilatation et de tension dans le sens longitudinal de la baguette. La vitesse de propagation dépend uniquement du module d'élasticité et de la densité du matériau, si le diamètre de la baguette est nettement inférieur à sa longueur. Dans l'expérience, elle est déterminée à partir des durées des impulsions acoustiques après une excitation impulsionnelle.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Jeu d'appareils « Propagation du son dans des barres » (230 V, 50/60 Hz)	**1018469 ou**
	Jeu d'appareils « Propagation du son dans des barres » (115 V, 50/60 Hz)	**1018468**
1	Oscilloscope USB 2x50 MHz	**1017264**
2	Câble BNC, 0,5 m	**5007670**

GENERALITES

Les ondes acoustiques ne se propagent pas seulement dans des gaz ou des liquides, mais aussi dans des solides. Dans les solides, les ondes peuvent apparaître sous la forme d'ondes longitudinales, transversales, de dilatation ou de flexion.

Une onde longitudinale élastique est propagée dans une baguette par une séquence périodique de dilatation et de tension dans le sens longitudinal de la baguette. La dilatation est provoquée par une déviation périodique des atomes de leurs positions de repos. Avec une baguette dont le diamètre est

nettement inférieur à sa longueur, la contraction transversale est négligeable, c'est-à-dire que pour l'indice de Poisson, on obtient dans une bonne approximation $\mu = 0$. Dans ce cas, les équations suivantes décrivent le rapport entre les modifications dans le temps et dans l'espace de la tension σ et la déviation ξ :

(1) $$\frac{\partial\sigma}{\partial x} = \rho \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \quad \text{et} \quad \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{E} \cdot \frac{\partial\sigma}{\partial t} \quad \text{avec} \quad v = \frac{\partial\xi}{\partial t},$$

ρ : densité du matériau de la baguette,
E : module d'élasticité du matériau de la baguette

Il en résulte les équations d'ondes

(2) $$\frac{\partial^2\sigma}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{\partial^2\sigma}{\partial x^2} \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$$

avec la vitesse du son longitudinale

(3) $$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Dans l'expérience, les ondes acoustiques longitudinales dans des baguettes de différents matériaux et longueurs sont générées par une excitation impulsionnelle à l'une des extrémités des baguettes, détectées par des sondes microphoniques à l'extrémité excitée et à l'extrémité opposée des baguettes, puis représentées sur un oscilloscope. Les extrémités des baguettes constituent des surfaces limite réverbérantes entre lesquelles les impulsions acoustiques vont et viennent. Les oscillogrammes permettent de déterminer la durée des impulsions acoustiques.
Avec ces baguettes longues, les impulsions acoustiques réfléchies plusieurs fois sont nettement distinctes dans le temps, tandis qu'avec des baguettes courtes, elles peuvent se superposer en «ondes stationnaires».

EVALUATION

Les durées des impulsions acoustiques permettent de déterminer les vitesses de son longitudinales d'après

(4) $$c_L = \frac{2 \cdot L}{T}, \quad L : \text{longueur de baguette}$$

car l'impulsion acoustique traverse la baguette deux fois pendant le temps T.

Les vitesses de son déterminées et les densités de matériaux déterminées par pesage permettent de calculer les modules d'élasticité d'après (3).

Tab. 1 : Vitesses de son longitudinales c_L, densités ρ et modules d'élasticité E mesurées pour différents matériaux.

Matériel	c_L (m / s)	ρ (g / cm³)	E (m / s)
Verre	5370	2,53	73
Aluminium	5110	2,79	73
Bois (hêtre)	5040	0,74	19
Acier inox	4930	7,82	190
Cuivre	3610	8,84	115
Laiton	3550	8,42	106
Plexiglas	2170	1,23	6
PVC	1680	1,50	4

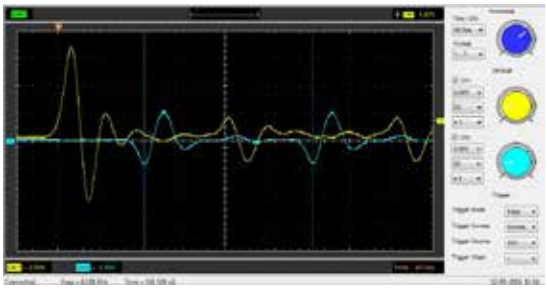


Fig. 1 : Propagation d'une impulsion acoustique, signal à l'extrémité de baguette excitée (jaune) (baguette en acier inox, 400 mm)

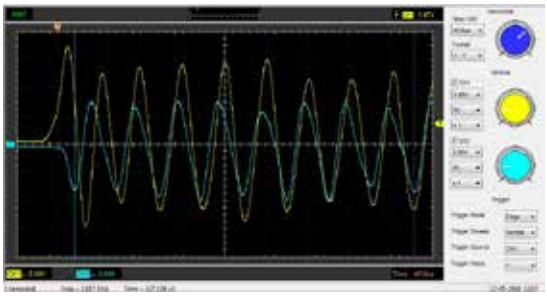


Fig. 2 : Onde stationnaire, signal à l'extrémité de baguette excitée (jaune) (baguette en acier inox, 100 mm)

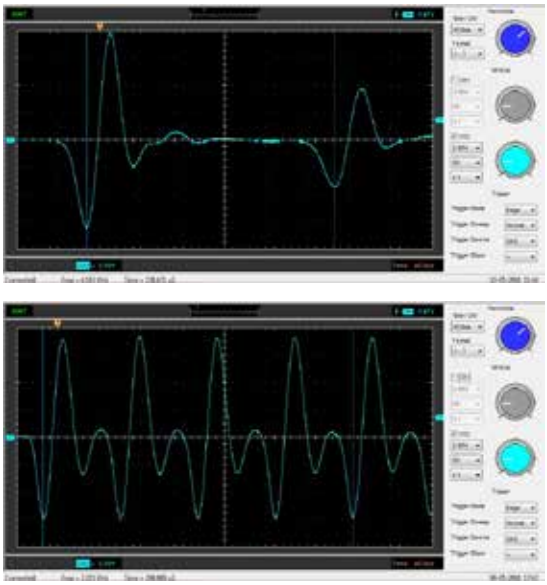


Fig. 3 : Propagation d'une impulsion acoustique (en haut : baguette en PVC, 200 mm, en bas : baguette en verre, 200 mm), signal à l'extrémité de baguette opposée à l'excitation (cyan)

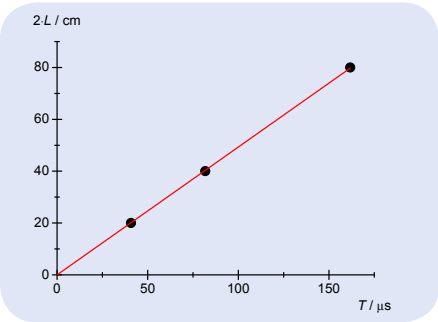
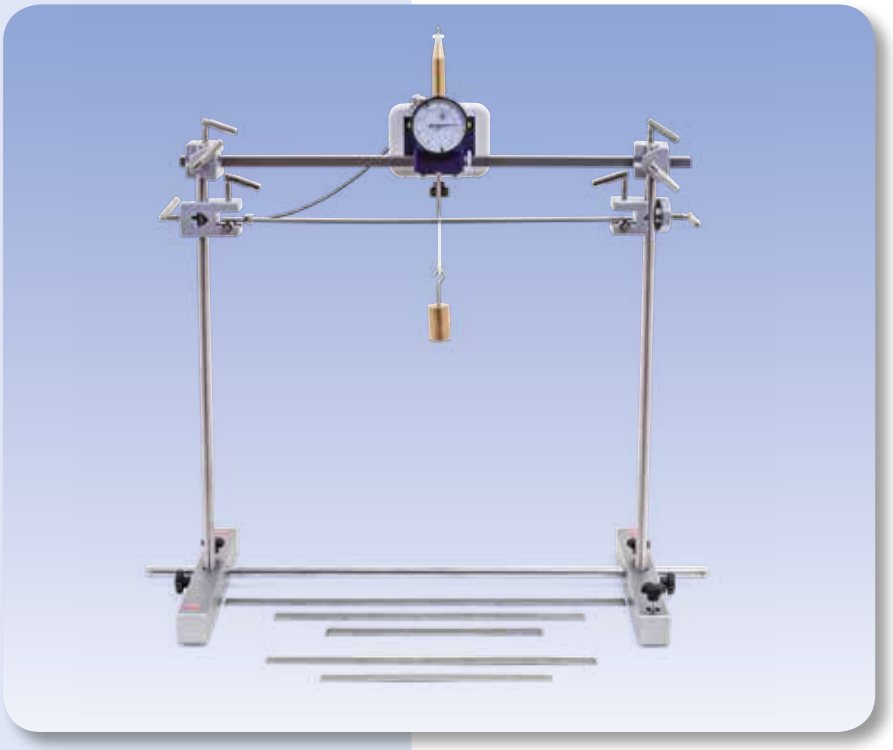
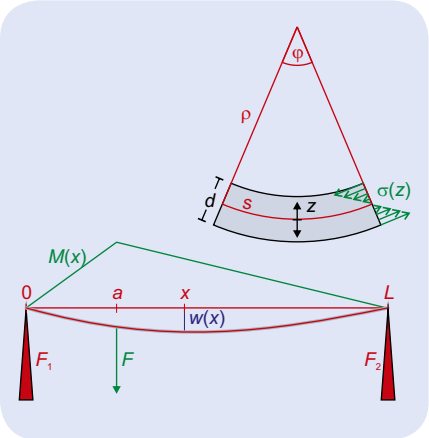


Fig. 4 : Double longueur de baguette $2 \cdot L$ en fonction des durées T pour les baguettes en acier inox

UE1090200 FLEXION DE BARRES PLATES





OBJECTIF

Mesurer la déformation de barres plates soutenues des deux côtés et déterminer le module d'élasticité

EXERCICES

- **Mesurer le profil de déformation à charge centrale et non-centrale.**
- **Mesurer la déformation en fonction de la force.**
- **Mesurer la déformation en fonction de la longueur, de la largeur, de l'épaisseur et du matériau et déterminer le module d'élasticité.**

RESUME

La résistance à la déformation d'une barre plate et plane contre la flexion résultant d'une force extérieure peut être calculée de façon analytique, si la déformation est nettement inférieure à la longueur de la barre. Elle est proportionnelle au module d'élasticité *E* du matériau de la barre. Dans l'expérience, on détermine le module d'élasticité pour l'acier et l'aluminium en mesurant la déformation en présence d'une force connue.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Appareil pour la mesure du module d'élasticité	**1018527**
1	Jeu d'extension pour le module d'élasticité	**1018528**
1	Décamètre à ruban de poche, 2 m	**1002603**
1	Micromètre 0-25 mm	**1002600**

GENERALITES

La résistance à la déformation d'une barre plate et plane contre la flexion résultant d'une force extérieure peut être calculée de façon analytique, si la déformation est nettement inférieure à la longueur de la barre. Elle est proportionnelle au module d'élasticité *E* du matériau de la barre. Donc, la déformation de la barre en présence d'une force connue permet de déterminer le module d'élasticité.

Pour le calcul, on divise la barre en fibres parallèles qui, en cas de flexion, sont comprimées du côté intérieur et allongées du côté extérieur. La fibre neutre n'est ni comprimée, ni allongée, tandis que l'allongement relatif ou la compression relative ε des autres fibres et la contrainte σ qui en résulte dépendent de l'écart *z* avec la fibre neutre :

(1) $$\varepsilon(z) = \frac{s + \Delta s(z)}{s} = \frac{z}{\rho(x)} \quad \text{et} \quad \sigma(z) = E \cdot \varepsilon(z)$$

$\rho(x)$: rayon de courbure local de la flexion

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

2

Pour la courbure, il faut donc appliquer le moment de flexion local

(2) $$M(x)=\int_A \sigma(z)\cdot z\cdot dA=\frac{1}{\rho(x)}\cdot E\cdot I$$

avec $I=\int_A z^2\cdot dA$: moment quadratique.

Comme variante au rayon de courbure $\rho(x)$, on mesure dans l'expérience le profil de déformation $w(x)$ de la fibre neutre depuis sa position de repos, calculé de la manière suivante. Tant que les modifications $dw(x)$ / dx de la déformation sont suffisamment petites, on peut appliquer

(3) $$\frac{d^2w}{dx^2}(x)=\frac{1}{\rho(x)}=\frac{M(x)}{E\cdot I},$$

qui permet d'obtenir le profil de déformation par une double intégration.

Un exemple classique est l'observation d'une barre de longueur L soutenue aux deux extrémités, qu'une force F exercée sur a tire vers le bas. En équilibre, la somme de toutes les forces exercées est nulle :

(4) $$F_1+F_2-F=0$$

Il en est de même pour la somme de tous les moments agissant à un endroit quelconque x de la barre :

(5) $$M(x)-F_1\cdot x-F_2\cdot(L-x)+F\cdot(a-x)=0$$

Aucune courbure ni déformation n'est observée aux extrémités de la barre, donc $M(0) = M(L) = 0$ et $w(0) = w(L) = 0$. Ainsi, $M(x)$ est déterminé dans son intégralité :

(6) $$M(\zeta)=\begin{cases} F\cdot L\cdot(1-\alpha)\cdot\zeta; & 0\le\zeta\le\alpha \\ F\cdot L\cdot\alpha\cdot(1-\zeta); & \alpha<\zeta\le 1\end{cases}$$

$$\text{avec } \zeta=\frac{x}{L} \text{ et } \alpha=\frac{a}{L}$$

Une double intégration permet d'obtenir le profil de déformation

(7) $$w(\zeta)=\begin{cases} \frac{F\cdot L^3}{E\cdot I}\cdot\left[(1-\alpha)\cdot\frac{\zeta^3}{6}-\left(\frac{\alpha^3}{6}-\frac{\alpha^2}{2}-\frac{\alpha}{3}\right)\cdot\zeta\right] \\ \frac{F\cdot L^3}{E\cdot I}\cdot\left[\frac{\alpha^3}{6}-\left(\frac{\alpha^3}{6}+\frac{\alpha}{3}\right)\zeta+\frac{\alpha}{2}\cdot\zeta^2-\frac{\alpha}{6}\zeta^3\right]\end{cases}$$

Sa courbe est vérifiée dans l'expérience avec une charge centrale ($\alpha = 0{,}5$) et une charge non-centrale ($\alpha < 0{,}5$).

EVALUATION

En cas de charge centrale, $w(x=\frac{L}{2},a=\frac{L}{2})=-\frac{F\cdot L^3}{48\cdot E\cdot I}$

Pour un rectangle de largeur b et de hauteur d, on calcule

$$I=\int_A z^2\cdot dA=\int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} z^2\cdot b\cdot dz=\frac{d^3}{12}\cdot b$$

Dans ce cas, $w(x=\frac{L}{2},a=\frac{L}{2})=-\frac{1}{4}\cdot\frac{F}{E}\cdot\frac{L^3}{d^3}\cdot\frac{1}{b}$

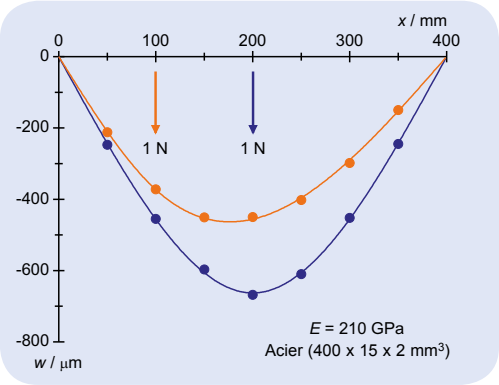


Fig. 1 : Profil de déformation mesuré et calculé en cas de charge centrale et non-centrale

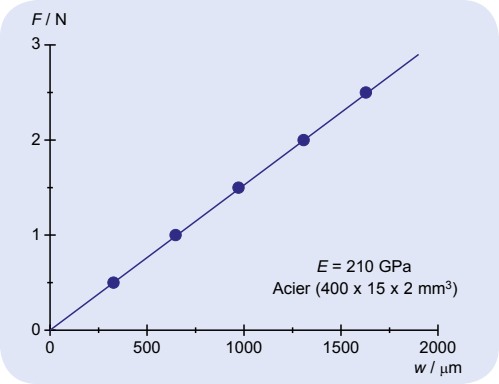


Fig. 2 : Confirmation de la loi de Hooke

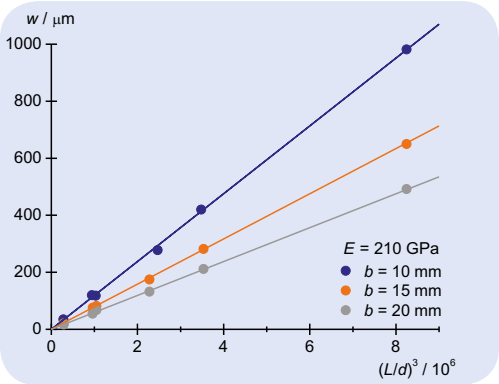


Fig. 3 : Rapport entre la déformation et $(L/d)^3$

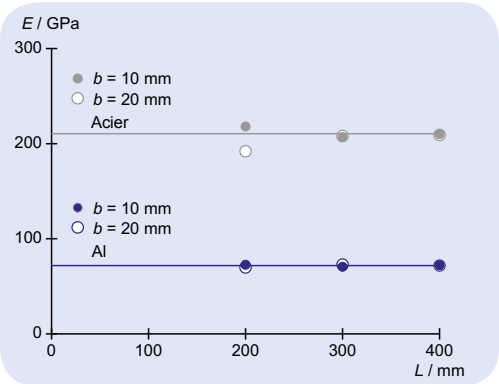
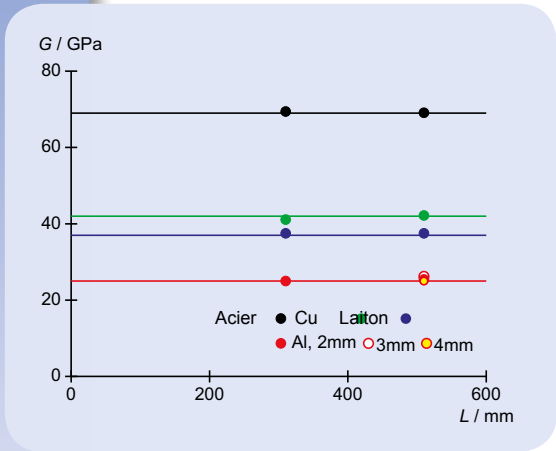


Fig. 4 : Module d'élasticité l'acier et de l'aluminium

UE1090300 TORSION DE BAGUETTES RONDES



OBJECTIF

Déterminer la référence angulaire et le module de cisaillement

EXERCICES

- **Déterminer la référence angulaire de baguettes rondes en fonction de la longueur**
- **Déterminer la référence angulaire de baguettes rondes en fonction du diamètre**
- **Déterminer la référence angulaire de baguettes rondes de différents matériaux et déterminer le module de cisaillement**

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

2

RESUME

Pour qu'il puisse se déformer, un corps solide doit subir une force extérieure, à laquelle s'oppose une résistance qui dépend du matériau et de la géométrie du corps ainsi que de la direction de la force appliquée. La déformation est réversible et proportionnelle à la force appliquée, tant que celle-ci n'est pas trop forte. Un exemple souvent étudié est la torsion d'une baguette ronde homogène serrée d'un côté. On peut calculer par l'analyse sa résistance à la déformation et la déterminer en mesurant la durée d'oscillation après avoir monté un système oscillant constitué d'une baguette et d'un balancier.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Appareil de torsion	**1018550**
1	Jeu d'extension pour l'appareil de torsion	**1018787**
1	Barrière photoélectrique	**1000563**
1	Compteur numérique (230 V, 50/60 Hz)	**1001033 ou**
	Compteur numérique (115 V, 50/60 Hz)	**1001032**

GENERALITES

Pour qu'il puisse se déformer, un corps solide doit subir une force extérieure, à laquelle s'oppose une résistance qui dépend du matériau et de la géométrie du corps ainsi que de la direction de la force appliquée. La déformation est élastique, par conséquent réversible et proportionnelle à la force appliquée, tant que celle-ci n'est pas trop forte.

Un exemple souvent étudié est la torsion d'une baguette ronde homogène serrée d'un côté, car sa résistance à la déformation peut être calculée par l'analyse. Pour cela, coupez la baguette ronde en coupes radiales et cylindriques pour obtenir des segments de longueur L. La torsion de la baguette à l'extrémité libre dans un petit angle ψ entraîne le cisaillement de tous les segments avec un rayon r sans courbure dans un angle

(1) $$\alpha_r = \frac{r}{L} \cdot \psi$$

(Fig. 1). Il faut appliquer la tension de cisaillement

(2) $$\tau_r = \frac{dF_{r,\varphi}}{dA_{r,\varphi}} = G \cdot \alpha_r$$

G : module de cisaillement du matériau de la baguette

en exerçant la force partielle $dF_{r,\phi}$ dans le sens tangentiel sur la surface frontale

(3) $$\Delta A_{r,\varphi} = r \cdot d\varphi \cdot dr$$

du segment. On obtient

(4) $$dF_{r,\varphi} = G \cdot \frac{r^2}{L} \cdot \psi \cdot d\varphi \cdot dr$$

qui permet de calculer aisément la force dF_r nécessaire à la torsion du cylindre creux de rayon r et d'angle ψ ainsi que le couple correspondant dM_r :

(5) $$dM_r = r \cdot dF_r = G \cdot 2\pi \cdot \frac{r^3}{L} \cdot \psi \cdot dr$$

Pour la torsion du cylindre plein de rayon r_0, on applique

(6) $$M = \int_0^{r_0} dM_r = D \cdot \psi \quad \text{avec} \quad D = G \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{r_0^4}{L}$$

Il y a proportionnalité entre le couple M et l'angle de torsion ψ, c'est-à-dire que la référence angulaire D est constante, tant que le couple M n'est pas trop grand. Si les valeurs sont trop grandes, la déformation devient plastique et irréversible.
Dans l'expérience, pour déterminer la référence angulaire, on relie un balancier à l'extrémité fixe de la baguette et on l'oscille sur l'axe de torsion avec une durée d'oscillation

(7) $$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J}{D}},$$

J : moment d'inertie du balancier

en évitant de trop fortes déviations. En connaissant le moment d'inertie, on peut calculer la référence angulaire à partir de la durée d'oscillation. Plus exactement, on répartit le moment d'inertie J_0 du balancier et le moment d'inertie de deux masses supplémentaires m, qui sont agencées dans un rayon R autour de l'axe de torsion :

(8) $$J = J_0 + 2 \cdot m \cdot R^2$$

Puis, on mesure la durée d'oscillation T pour le balancier avec la masse supplémentaire ainsi que la durée d'oscillation T_0 pour le balancier sans masses supplémentaires.

EVALUATION

Pour la référence angulaire, on calcule l'équation de détermination à partir de (7) et (8).

$$D = 4\pi^2 \cdot \frac{2 \cdot m \cdot R^2}{T^2 - T_0^2}$$

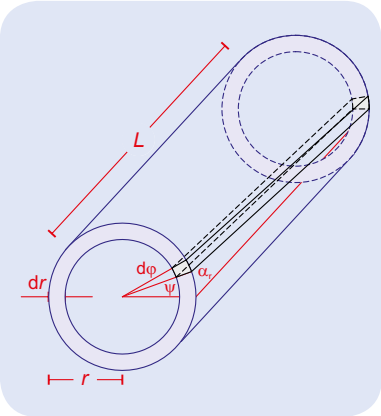


Fig. 1 : Représentation schématique permettant de calculer le couple dM_r requis pour la torsion d'un cylindre creux de longueur L, de rayon r et d'épaisseur de paroi d_r.

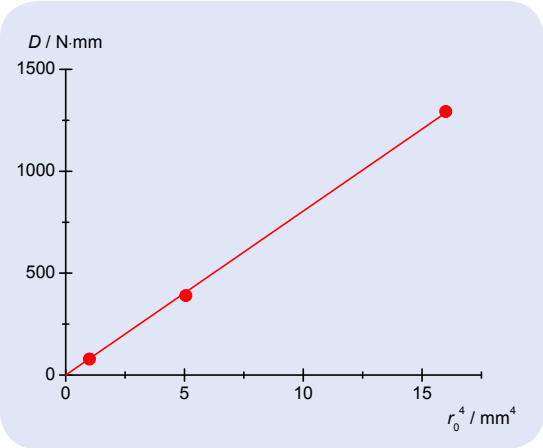


Fig. 2 : Référence angulaire de baguettes en aluminium de 500 mm de long en fonction de r_0^4.

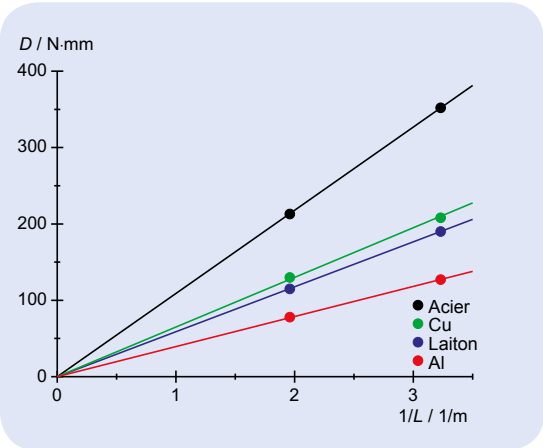


Fig. 3 : Référence angulaire des baguettes rondes en fonction de 1/L.

UE2040120 LOI D'AMONTONS

EXERCICES

- **Mesure ponctuelle de la pression *p* de l'air incluse en fonction de la température *T***
- **Représentation des valeurs de mesure dans un diagramme *p-T***
- **Confirmation de la loi d'Amontons**

OBJECTIF

Confirmation du rapport linéaire entre la pression et la température d'un gaz idéal

RESUME

La validité de la loi d'Amontons pour les gaz parfaits est démontrée à l'exemple de l'air. Pour cela, à l'aide d'un bain d'eau, on réchauffe l'air contenu dans le volume fermé d'une sphère creuse métallique et on mesure en même temps la température et la pression.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Boule de gaz de Jolly	**1012870**
1	Agitateur magnétique chauffant (230 V, 50/60 Hz)	**1002807 ou**
	Agitateur magnétique chauffant (115 V, 50/60 Hz)	**1002806**
1	Thermomètre de poche numérique ultra-rapide	**1002803**
1	Sonde à immersion NiCr-Ni type K, - 65°C – 550°C	**1002804**
1	Jeu de 10 béchers, forme basse	**1002872**
1	Socle pour statif, trépied, 150 mm	**1002835**
1	Tige statif, 250 mm	**1002933**
1	Noix double	**1002827**
1	Pince universelle	**1002833**

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

1

GENERALITES

Le volume d'une quantité de gaz dépend de la pression sous laquelle se trouve le gaz et de sa température. À volume et quantité constants, le quotient de la pression et de la température est constant. Cette loi découverte par *Guillaume Amontons* s'applique aux gaz à l'état parfait, c'est-à-dire lorsque la température du gaz est largement supérieure à la température dite « critique ».

La loi découverte par Amontons

(1) $$\frac{p}{T} = \text{const.}$$

est un cas particulier de la loi générale sur les gaz valable pour tous les gaz parfaits, qui décrit le rapport entre la pression p, le volume V, la température T rapportée au point zéro absolu et la quantité n d'un gaz :

(2) $$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$R = 8{,}314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \text{ : constante de gaz universelle}$$

Applicable de manière générale, l'équation (2) permet de déduire le cas particulier (1), à condition que le volume V et la quantité de matière incluse n ne se modifient pas.
Dans l'expérience, la validité de la loi d'Amontons est démontrée à l'exemple de l'air qui sert de gaz parfait. Pour cela, à l'aide d'un bain d'eau, on réchauffe l'air contenu dans le volume fermé d'une sphère creuse métallique. On mesure en même temps la température ϑ en °C à l'aide d'un thermomètre numérique et la pression p à l'aide du manomètre branché à la sphère creuse.

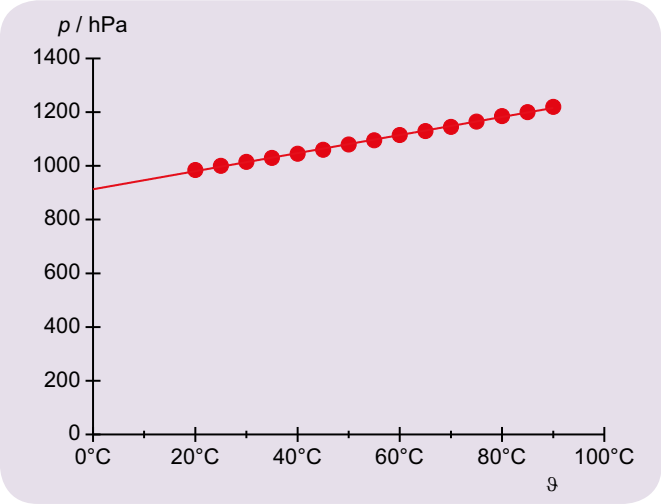


Fig. 1 : Diagramme pression/température de l'air à volume et quantité constants.

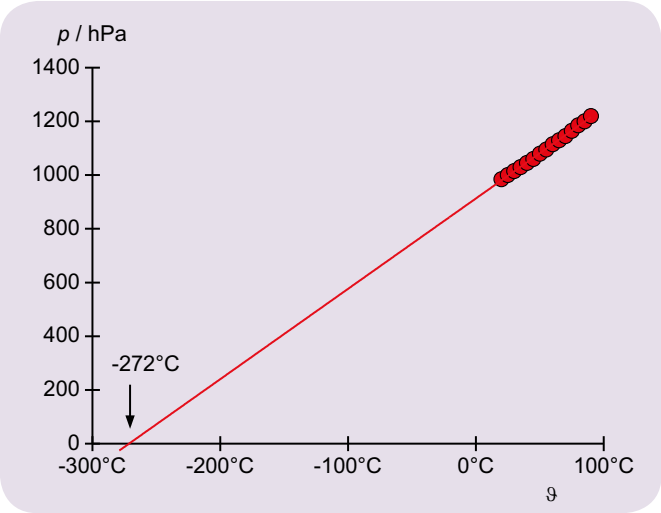


Fig. 2 : Extrapolation de la pression jusqu'à la valeur $p = 0$.

EVALUATION

Le rapport linéaire entre la pression et la température est confirmé par l'adaptation d'une droite

(3) $$p = a \cdot \vartheta + b$$

aux points de mesure. L'extrapolation de la pression p jusqu'à la valeur 0 permet de déterminer le point zéro absolu de la température :

(4) $$\vartheta_0 = -\frac{b}{a} \; [°\text{C}]$$

UE3030350 BALANCE AMPEREMETRIQUE

EXERCICES

- **Mesure de la force sur un conducteur sous tension en fonction de l'intensité de courant**
- **Mesure de la force sur un conducteur sous tension en fonction de la longueur**
- **Calibrage du champ magnétique**

OBJECTIF

Mesurer la force exercée sur un conducteur sous tension dans un champ magnétique

RESUME

La balance ampèremétrique repose sur des expériences réalisées par *André-Marie Ampère* sur le courant électrique. À l'aide d'une balance, elle mesure la force de Lorentz exercée sur un conducteur sous tension dans un champ magnétique. Dans la présente expérience, le conducteur sous tension est accroché à une suspension rigide et exerce une force de même valeur, mais opposée à la force de Lorentz, sur l'aimant permanent qui génère le champ magnétique. Ainsi, le poids de l'aimant permanent en est apparemment modifié.

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

1

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Jeu d'appareils « Balance ampèremétrique »	**1019188**
1	Balance électronique Scout Pro 200 g (230 V, 50/60 Hz	**1009772**
1	Alimentation CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	**1003312**
1	Tige statif, 250 mm	**1002933**
1	Socle pour statif, trépied, 150 mm	**1002835**
1	Interrupteur bipolaire	**1018439**
3	Paire de cordons, 75 cm	**1002850**

GENERALITES

La balance ampèremétrique repose sur des expériences réalisées par *André-Marie Ampère* sur le courant électrique. À l'aide d'une balance, elle mesure la force exercée sur un conducteur sous tension dans un champ magnétique. Dans l'expérience, une balance de précision électronique moderne mesure le poids d'un aimant permanent. Le poids se modifie conformément à la 3e loi de Newton, si une force de Lorentz est exercée à travers le champ magnétique sur un conducteur sous tension plongé dans ce champ.

Sur la balance repose un aimant permanent qui génère un champ magnétique horizontal ***B***. Dans cet agencement, un conducteur horizontal de longueur *L*, accroché à une barre rigide, plonge perpendiculairement dans le champ magnétique. La force de Lorentz agit sur le conducteur

(1) $$\boldsymbol{F}_L = N \cdot e \cdot \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B},$$

e : charge élémentaire,

N : total de tous les électrons participant à la ligne électrique

La vitesse de dérive moyenne ***v*** est d'autant plus grande que le courant *I* traversant le conducteur est important :

(2) $$I = n \cdot e \cdot A \cdot v$$

n : densité de tous les électrons participant à la ligne électrique,

A : surface de section du conducteur

Comme

(3) $$N = n \cdot A \cdot L$$

L : longueur du conducteur

on obtient au total

(4) $$\boldsymbol{F}_L = I \cdot L \cdot \boldsymbol{e} \times \boldsymbol{B}$$

ou

(5) $$F_L = I \cdot L \cdot B$$

car le vecteur d'unité ***e*** indiquant le sens du conducteur est perpendiculaire au champ magnétique. Conformément à la troisième loi de Newton, une force opposée ***F*** de même valeur est exercée sur l'aimant permanent. Selon le signe qui le précède, le poids ***G*** de l'aimant permanent sur la balance est augmenté ou réduit. Grâce à la fonction de tare de la balance, le poids *G* peut être compensé par voie électronique, de sorte que la balance affiche immédiatement la force opposée *F*.

EVALUATION

Une droite passant par l'origine (Fig. 2) décrit bien le rapport entre le courant et la force de Lorentz. Ce n'est pas le cas pour le rapport avec la longueur (Fig. 3), car les effets marginaux aux extrémités du conducteur jouent un rôle. On calcule le champ magnétique de l'aimant permanent complet à partir des pentes de droite $a_2 = B\,L$ (Fig. 2) et $a_3 = B\,I$ (Fig. 3).

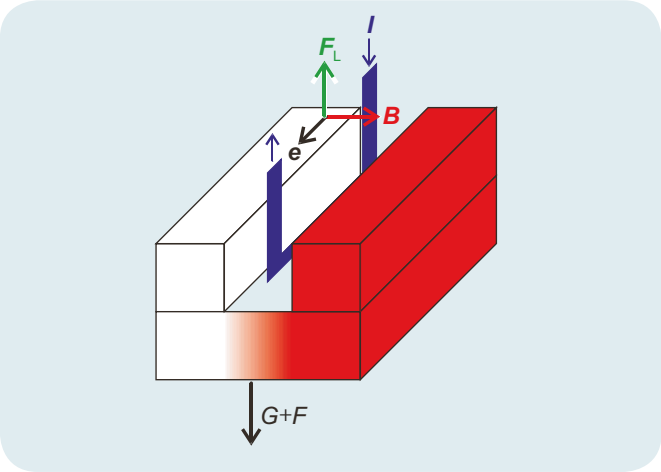


Fig. 1 : Représentation schématique de la force Lorentz F_L exercée sur le conducteur sous tension et la force totale $G + F$ sur la balance

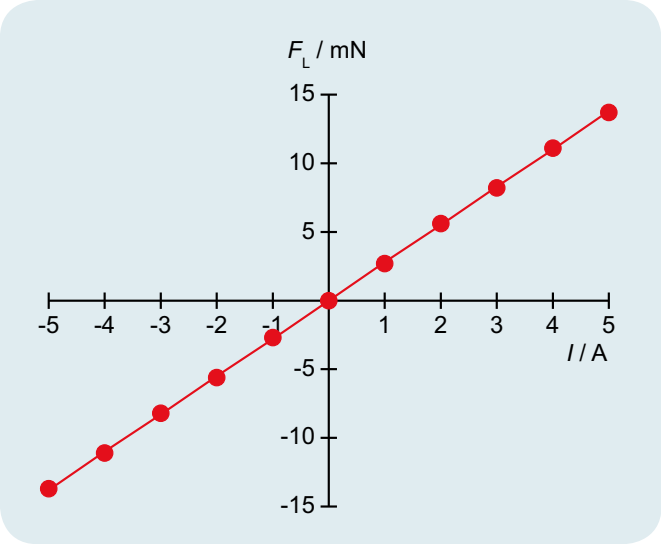


Fig. 2 : Force F_L en fonction de l'intensité de courant *I*

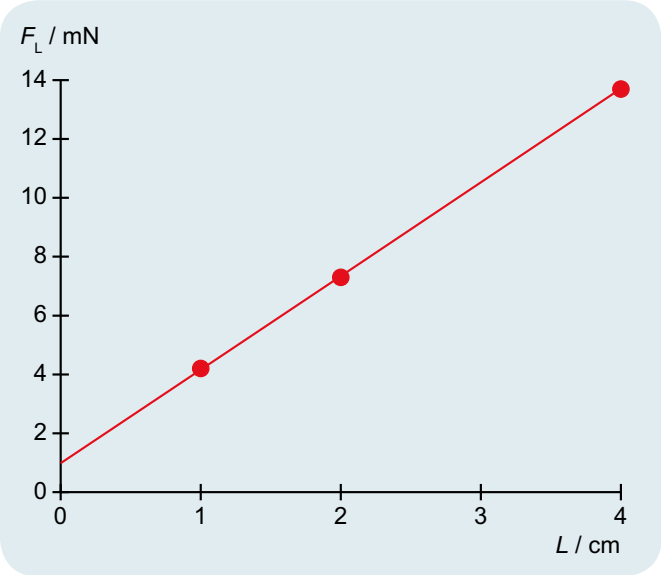
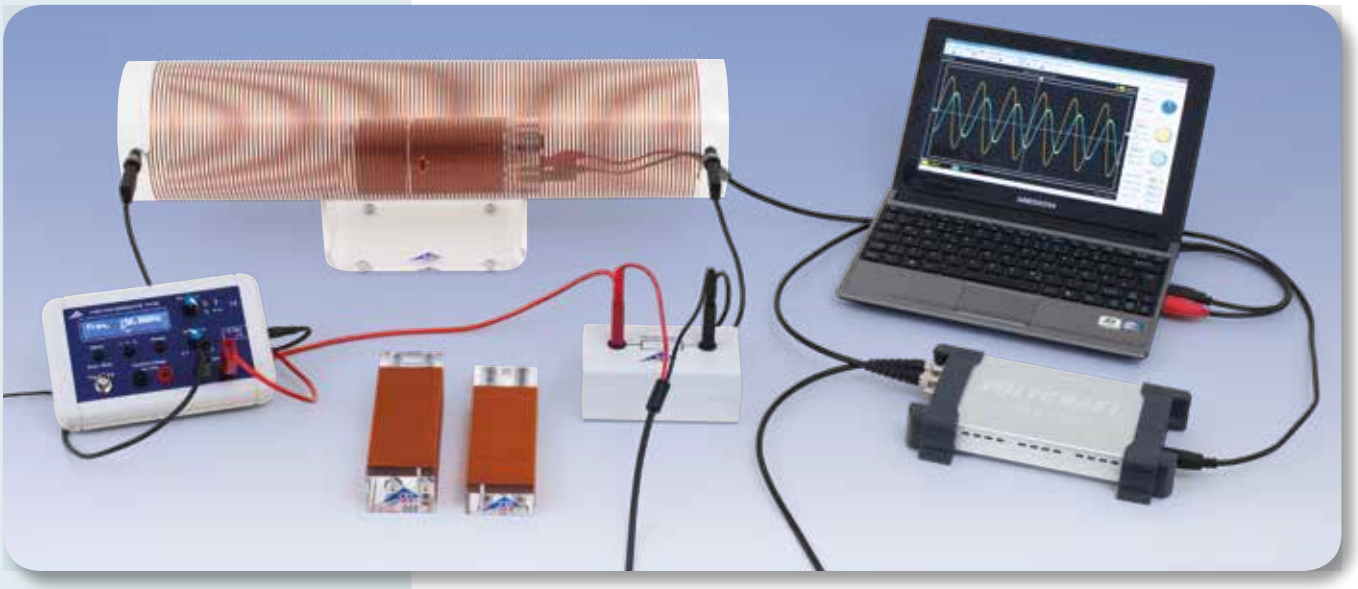


Fig. 3 : Force F_L en fonction de la longueur du conducteur *L*

UE3040300

INDUCTION PAR UN CHAMP MAGNETIQUE VARIABLE



EXERCICES

- **Mesure de la tension d'induction en fonction du nombre de spires *N* de la bobine d'induction**
- **Mesure de la tension d'induction en fonction de la surface de section *A* de la bobine d'induction**
- **Mesure de la tension d'induction en fonction de l'amplitude I_0 du courant alternatif induit**
- **Mesure de la tension d'induction en fonction de la fréquence *f* du courant alternatif induit**
- **Mesure de la tension d'induction en fonction de la forme du signal du courant alternatif induit**

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

1

OBJECTIF

Mesure de la tension d'induction dans une bobine d'induction

RESUME

Si une boucle conductrice fermée avec *N* spires se trouve dans une bobine cylindrique traversée par un courant alternatif, le flux magnétique traversant la boucle et se modifiant dans le temps induit une tension électrique. Cette tension d'induction dépend du nombre de spires et de la surface de section de la boucle conductrice ainsi que de la fréquence, de l'amplitude et de la forme du signal du courant alternatif appliqué à la bobine de champ. Ces dépendances sont étudiées et comparées avec la théorie.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Jeu de 3 bobines d'inductance	**1000590**
1	Bobine de champ 120 mm	**1000592**
1	Support pour bobines cylindriques	**1000964**
1	Résistance de précision 1 Ω	**1009843**
1	Générateur de fonctions FG 100 (230 V, 50/60 Hz)	**1009957 ou**
	Générateur de fonctions FG 100 (115 V, 50/60 Hz)	**1009956**
1	Oscilloscope USB 2x50 MHz	**1017264**
2	Cordon HF, BNC / douille 4 mm	**1002748**
1	Paire de cordons de sécurité, 75 cm, noir	**1002849**
1	Paire de cordons de sécurité, 75 cm, rouge/bleu	**1017718**

GENERALITES

Toute modification du flux magnétique traversant une boucle conductrice fermée à *N* spires induit une tension électrique dans celle-ci. Une telle modification survient par ex. lorsque la boucle conductrice se trouve dans une bobine cylindrique traversée par un courant alternatif.

Selon la loi de Faraday sur l'induction, on a pour la tension induite dépendante du temps :

(1) $$U(t) = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}(t).$$

Le flux magnétique Φ traversant une surface A est donné par

(2) $$\Phi = B \cdot A$$

B : densité de flux magnétique

lorsque la densité de flux magnétique B traverse perpendiculairement la surface A. Il en résulte de l'équation (1) :

(3) $$U(t) = -N \cdot A \cdot \frac{dB}{dt}(t).$$

La bobine de champ génère dans la boucle conductrice la densité de flux magnétique :

(4) $$B = \mu_0 \cdot \frac{N_F}{L_F} \cdot I$$

$\mu_0 = 4_\pi \cdot 10^{-7}$ N/A^2 : perméabilité du vide, N_F : nombre de spires de la bobine de champ, L_F : longueur de la bobine de champ, I : courant traversant la bobine de champ

Il en résulte de l'équation (3) :

(5) $$U(t) = -\mu_0 \cdot N \cdot A \cdot \frac{N_F}{L_F} \cdot \frac{dI}{dt}(t).$$

Au cours de l'expérience, un générateur de fonctions permet dans un premier temps d'appliquer un signal sinusoïdal à une bobine de champ. L'amplitude I_0 du courant $I(t)$ traversant la bobine de champ est déterminée par une résistance intermédiaire montée en série. On mesure l'amplitude U_0 de la tension d'induction $U(t)$ en fonction du nombre de spires N et des surfaces de section A de la bobine d'induction ainsi que de la fréquence f du signal sinusoïdal et de l'amplitude I_0 du courant traversant la bobine de champ.
Mis à part le signal sinusoïdal, pour une bobine d'induction à quantité de spires et surface de section fixes ainsi qu'à fréquence fixe, on applique également un signal triangulaire et rectangulaire à la bobine de champ et on réalise des captures d'écran.

EVALUATION

Pour un courant dont la forme sinusoïdale

$$I = I(t) = I_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t),$$

est $$U(t) = U_0 \cdot [-\cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)]$$

avec $$U_0 = 2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_F}{L_F} \cdot N \cdot A \cdot I_0 \cdot f.$$

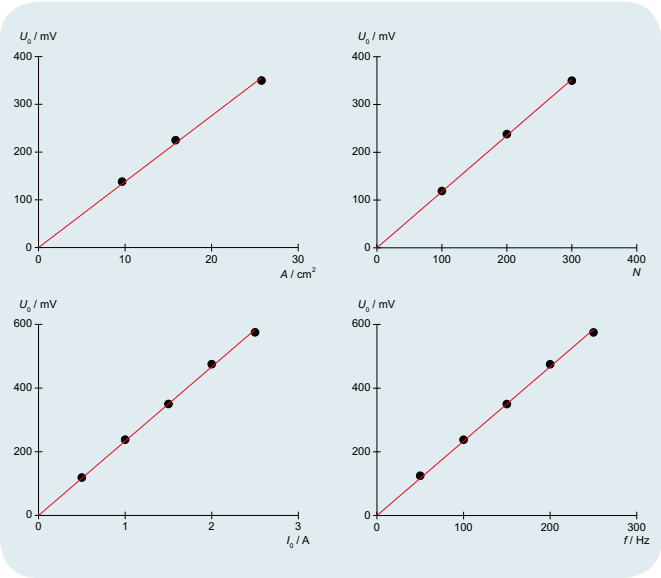


Fig. 1 : Amplitude de la tension d'induction en fonction du nombre de spires et de la surface de section de la bobine d'induction, de l'amplitude du courant traversant la bobine de champ et de la fréquence du signal sinusoïdal appliqué à la bobine de champ.

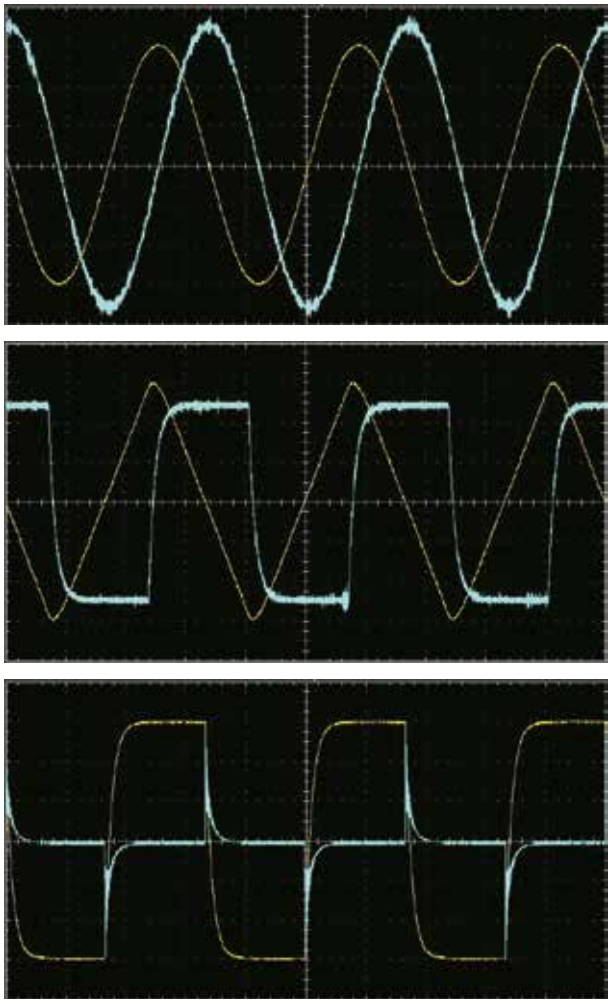


Fig. 2 : Captures d'écran des courbes de temps de la tension d'induction pour un signal sinusoïdal (en haut à gauche), triangulaire (en haut à droite) et rectangulaire (en bas) appliqué à la bobine de champ.

UE4010000 REFLEXION SUR LE MIROIR

EXERCICES

- **Démontrer la loi de la réflexion sur un miroir plan.**
- **Déterminer la focale d'un miroir concave et démontrer la loi de la réflexion.**
- **Déterminer la focale virtuelle d'un miroir convexe.**

OBJECTIF

Étude de la réflexion sur des miroirs plans et courbes

RESUME

Lorsque des rayons lumineux sont réfléchis sur des miroirs, l'angle d'incidence correspond à l'angle de réflexion. Cette loi de la réflexion s'applique aux miroirs plans et courbes. Cependant, ce n'est que sur un miroir plan que les rayons à incidence parallèle sont réfléchis en rayons parallèles, car seul l'angle d'incidence de tous les rayons est identique. Le parallélisme n'est pas conservé sur le miroir concave et le miroir convexe. Les rayons parallèles sont concentrés dans un seul foyer.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Banc optique U, 1200 mm	**1003039**
3	Cavalier optique U, 75 mm	**1003041**
1	Cavalier optique U, 30 mm	**1003042**
1	Source lumineuse à LED	**1020630**
1	Diaphragme à iris sur tige	**1003017**
1	Porte diaphragme sur tige	**1000855**
1	Disque optique avec accessoires	**1003036**
1	Jeu de 5 accessoires d'optique	**1000607**

NOTIONS DE BASE GENERALES

Lorsque des rayons lumineux sont réfléchis sur des miroirs, l'angle d'incidence correspond à l'angle de réflexion. Cette loi de la réflexion s'applique aux miroirs plans et courbes. Cependant, ce n'est que sur un miroir plan que les rayons à incidence parallèle sont réfléchis en rayons parallèles, car seul l'angle d'incidence de tous les rayons est identique.

Si des rayons lumineux parallèles sous l'angle α tombent sur un miroir plan, ils sont réfléchis sous l'angle β conformément à la loi de la réflexion

(1) $$\alpha = \beta$$

α : angle d'incidence, β : angle de réflexion

Dans l'expérience, nous allons le démontrer pour trois rayons parallèles et déterminer l'angle de réflexion en fonction de l'angle d'incidence.
D'après la loi de la réflexion, si un rayon lumineux dont l'incidence est parallèle à l'axe optique tombe sur un miroir concave, il est réfléchi en symétrie à la normale d'incidence et coupe l'axe optique dans un écart

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

1

(2) $$f_\alpha = r - \overline{MF} = r \cdot \left(1 - \frac{1}{2 \cdot \cos\alpha}\right),$$

du miroir (Fig. 1 Rayon gauche). Pour les rayons proches de l'axe, on obtient à peu près cos α = 1 et ainsi

(3) $$f = \frac{r}{2}$$

indépendamment de l'écart avec l'axe optique. Ainsi, après la réflexion, tous les rayons parallèles proches de l'axe se rencontrent dans un foyer sur l'axe optique, qui se situe dans l'écart *f* du miroir concave. Si les rayons parallèles tombent sous un angle α par rapport à l'axe optique, ils sont réfléchis en un point commun se situant hors de l'axe optique.
Les rapports géométriques du miroir convexe correspondent à ceux du miroir concave, à la différence que les rayons lumineux divergent après la réflexion et convergent dans un foyer virtuel *f*' derrière le miroir (Fig. 1 Rayon droit). Pour la focale virtuelle *f*' d'un miroir convexe :

(4) $$f' = -\frac{r}{2}.$$

Dans l'expérience, le foyer du miroir concave ainsi que le foyer virtuel du miroir convexe sont déterminés à partir des trajectoires des rayons sur un disque optique. La validité de la loi de la réflexion est vérifiée pour le rayon du milieu.

EVALUATION

Les rayons parallèles qui tombent sur un miroir plan sont réfléchis de manière parallèle. La loi de la réflexion s'applique.
En cas de réflexion d'un faisceau de rayons parallèles sur un miroir concave, l'angle d'incidence pour chaque rayon se modifie de sorte que tous les rayons convergent dans le foyer.
De même, en cas de réflexion sur le miroir convexe, ils convergent dans un foyer virtuel situé derrière le miroir.

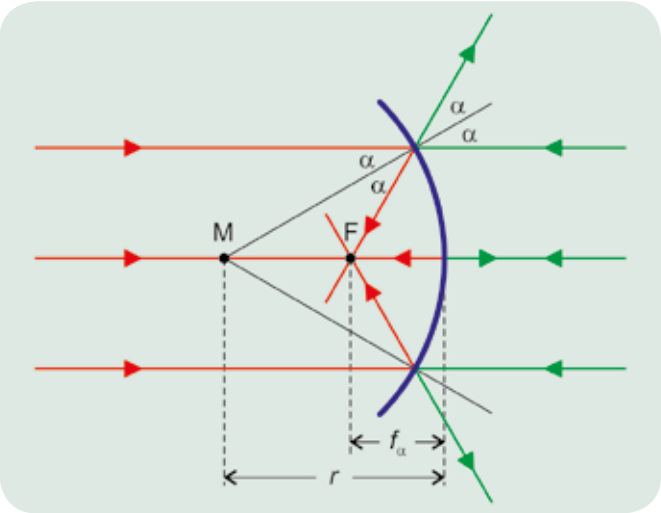


Fig. 1 : Représentation schématique pour déterminer la focale du miroir concave et du miroir convexe

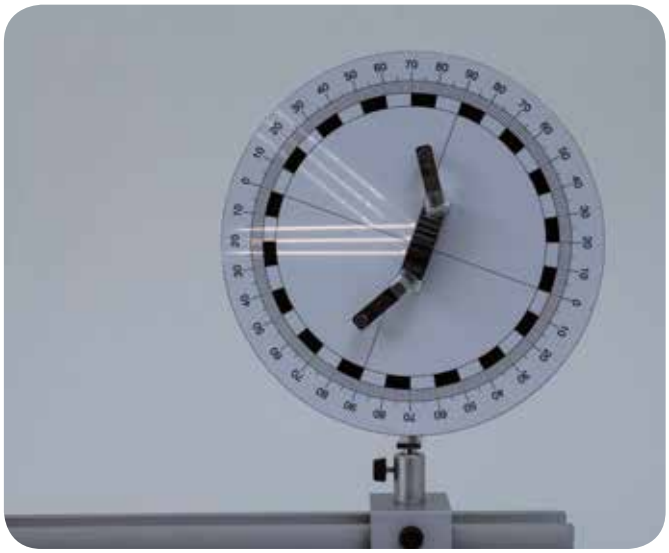


Fig. 2 : Réflexion de trois rayons parallèles sur le miroir plan

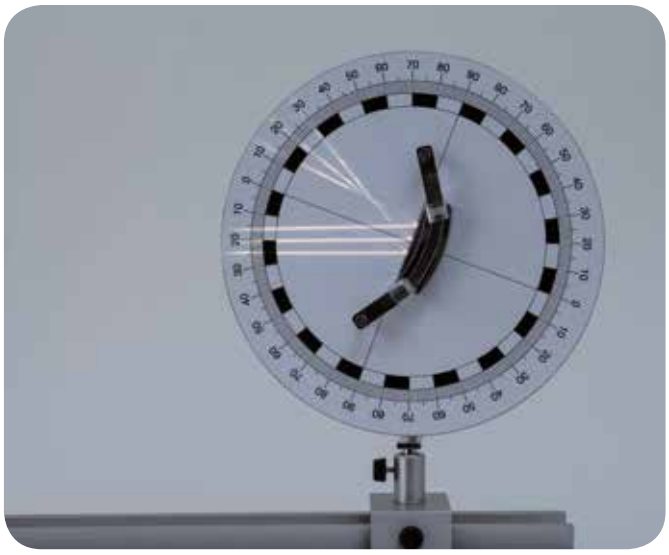


Fig. 3 : Réflexion de trois rayons parallèles sur le miroir concave

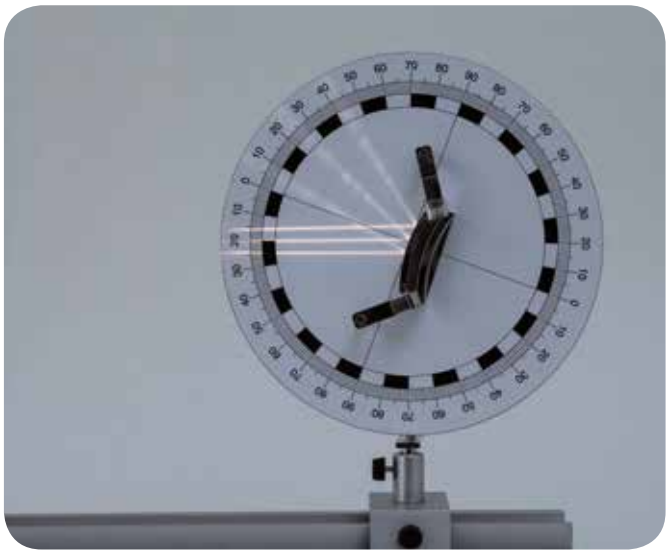


Fig. 4 : Réflexion de trois rayons parallèles sur le miroir convexe

UE4010020 REFRACTION DE LA LUMIERE

EXERCICES

- **Démontrer la loi de Snell-Descartes**
- **Déterminer l'indice de réfraction et l'angle limite de la réflexion totale pour le verre acrylique**
- **Observer et mesurer le rayon décalé parallèlement en cas de réfraction sur une plaque plane-parallèle**
- **Observer le rayon sur un prisme de déviation et un prisme à redressement**
- **Observer le rayon dans une lentille convexe et une lentille concave et déterminer les focales**

OBJECTIF

Étudier la réfraction de la lumière dans différents éléments optiques.

RESUME

La lumière se propage à différentes vitesses dans différents milieux. Dans un milieu optique mince, la vitesse de propagation est plus élevée que dans un milieu plus épais. C'est pourquoi on observe une réfraction de la direction lorsque le rayon lumineux traverse de biais l'interface de deux milieux. Dépendant du rapport des indices de réfraction de ce milieu, elle est décrite comme la loi de Snell-Descartes sur la réfraction. Dans l'expérience, ce comportement à la réfraction est étudié sur des éléments optiques en verre acrylique.

DISPOSITIFS NÉCESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Banc optique U, 1200 mm	**1003039**
3	Cavalier optique U, 75 mm	**1003041**
1	Cavalier optique U, 30 mm	**1003042**
1	Source lumineuse à LED	**1020630**
1	Diaphragme à iris sur tige	**1003017**
1	Porte diaphragme sur tige	**1000855**
1	Disque optique avec accessoires	**1003036**
1	Jeu de 5 accessoires d'optique	**1000607**

NOTIONS DE BASE GENERALES

La lumière se propage à différentes vitesses dans différents milieux. Dans un milieu optique mince, la vitesse de propagation est plus élevée que dans un milieu plus épais.

Le rapport entre la vitesse de la lumière c_0 dans le vide et celle dans le milieu est appelé indice de réfraction absolue n. Pour la vitesse de la lumière c dans le milieu, on a donc :

(1) $$c = \frac{c_0}{n}.$$

Si un rayon lumineux passe d'un milieu à l'indice de réfraction n_1 à un autre milieu à l'indice de réfraction n_2, la direction est modifiée à l'interface des deux milieux. Ce changement de direction est décrit par la loi de Snell-Descartes :

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

1

(2) $$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{c_2}{c_1}$$

α, n_1, c_1 : angle d'incidence, indice de réfraction et vitesse de propagation dans le milieu 1
β, n_2, c_2 : angle d'incidence, indice de réfraction et vitesse de propagation dans le milieu 2

Ainsi, lorsque le rayon lumineux passe d'un milieu mince à un milieu épais, il est réfracté en se rapprochant de la verticale et, lorsqu'il passe d'un milieu épais à un milieu mince, il est réfracté en s'écartant de la verticale. Dans le second cas, il existe un angle limite α_T où le rayon réfracté se propage à l'interface des deux milieux. Si l'angle d'incidence est encore plus grand, il n'y a pas de réfraction et la lumière incidente est réfléchie totalement.
Dans l'expérience, ce comportement à la réfraction est étudié sur un corps en demi-cercle, une plaque plane-parallèle, un prisme, une lentille convergente et une lentille divergente en verre acrylique. Le corps en demi-cercle convient notamment pour démontrer la loi de la réfraction, car aucune réfraction n'a lieu à l'interface en demi-cercle lorsque le rayon passe très précisément par le centre du cercle. Le côté longitudinal est orienté comme surface limite dans différents angles par rapport à l'axe optique (Fig. 1).
Par la réfraction du rayon lumineux à l'entrée et à la sortie d'une plaque plane-parallèle, on observe un décalage parallèle d qui dépend de l'angle d'incidence α. On a (Fig. 1) :

(3) $$d = h \cdot \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos\beta}$$, h : épaisseur de plaque.

Un prisme à 90° sert de prisme de déviation lorsque les rayons lumineux traversent perpendiculairement une cathète. Ils sont réfléchis sur l'hypoténuse et quittent le prisme en subissant une déviation de 90°. Avec le prisme à redressement, les rayons lumineux traversent perpendiculairement l'hypoténuse et sont réfléchis sur les deux cathètes. Ils quittent le prisme parallèlement au rayon lumineux indicent, mais dans la direction inverse (Fig. 1).
Dans une lentille convexe, des rayons lumineux parallèles convergent par la réfraction et divergent dans une lentille concave. (Fig. 1). Derrière la lentille, ils se rencontrent dans le foyer F ou divergent apparemment du foyer virtuel F' en partant devant la lentille.

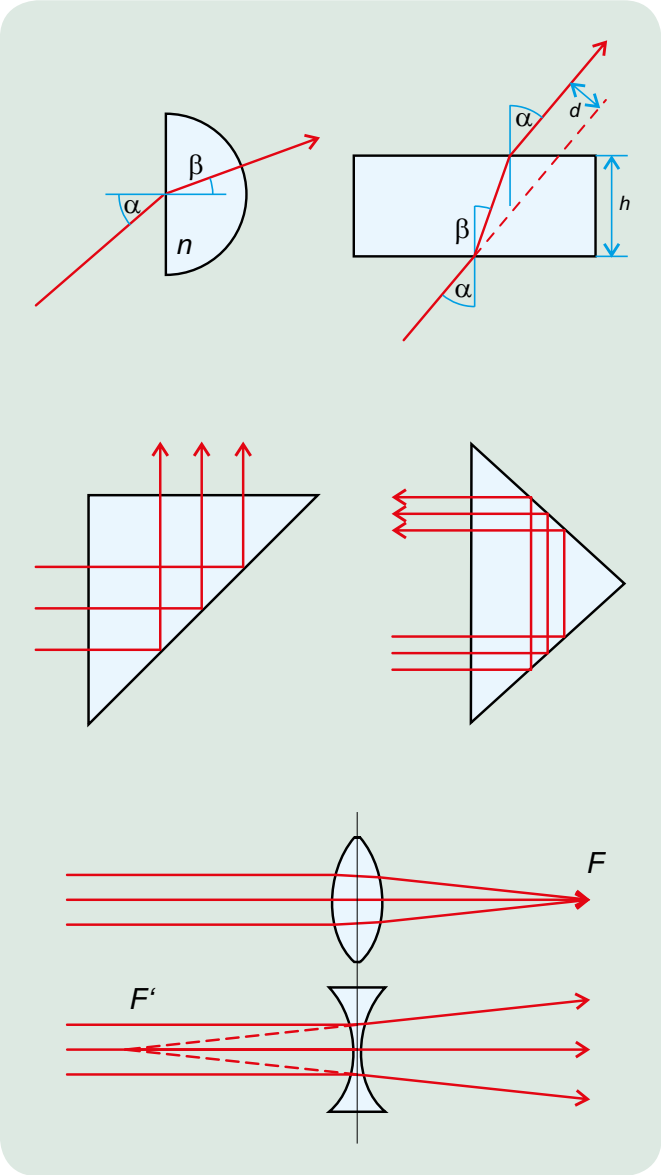


Fig. 1 : Réfraction sur le corps en demi-cercle, rayon traversant une plaque plane-parallèle, prisme de déviation et prisme à redressement, rayons traversant une lentille convexe et une lentille concave

EVALUATION

Dans l'expérience, on peut appliquer avec une précision suffisante pour l'air $n_1 = 1$.
Si l'angle d'incidence correspond à l'angle limite α_T de la réflexion totale, l'angle de réfraction $\beta = 90°$. L'équation (2) permet alors de déduire l'indice de réfraction n du verre acrylique.

$$\sin\alpha_T = \frac{1}{n}$$

La réfraction sur la plaque plane-parallèle découle de (2) et (3).

$$d = h \cdot (\sin\alpha \cdot - \cos\alpha \cdot \tan\beta) = h \cdot \sin\alpha \left(1 - \frac{\cos\alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}}\right)$$

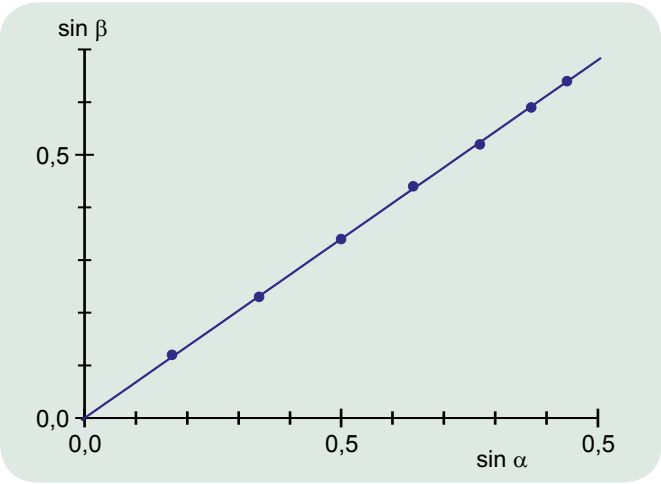
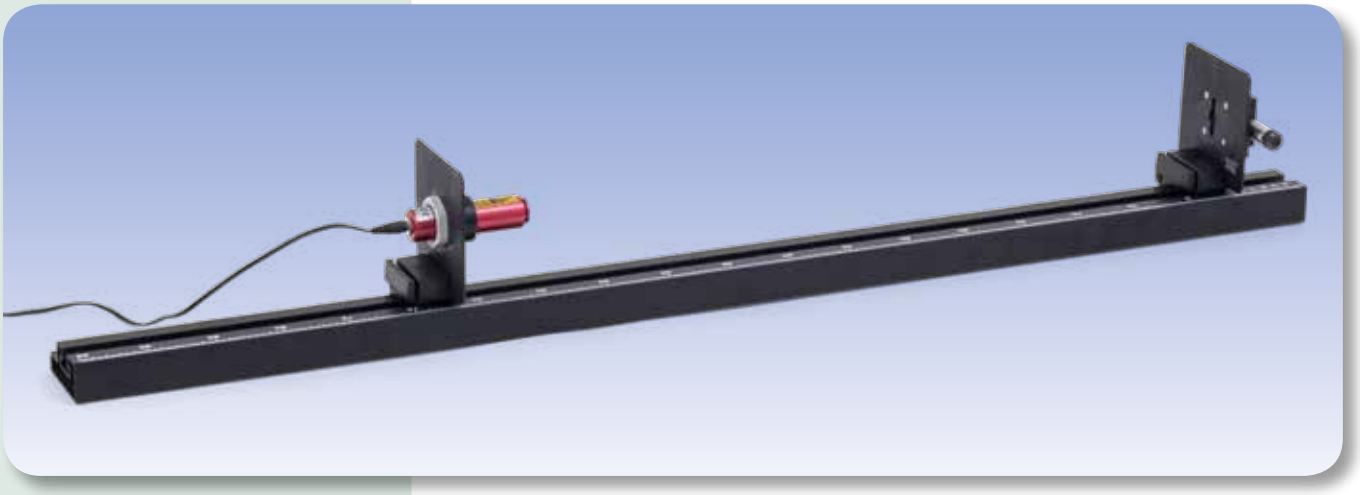


Fig. 2 : Diagramme permettant de déterminer l'indice de réfraction n

UE4030100 DIFFRACTION SUR UNE FENTE INDIVIDUELLE



EXERCICES

- **Étude de la diffraction sur une fente individuelle avec différentes largeurs de fente.**
- **Étude de la diffraction sur une fente individuelle avec différentes longueurs d'onde.**
- **Étude de la diffraction sur une fente individuelle et une traverse (principe de Babinet).**

OBJECTIF

Démontrer la nature des ondes de la lumière et déterminer la longueur d'onde

RESUME

La diffraction de la lumière sur une fente individuelle peut être décrite par la superposition des ondes élémentaires cohérentes qui, selon le principe de Huygens, se propagent dans toutes les directions à partir de la fente éclairée. Selon l'angle de propagation, les ondes interfèrent de manière constructive ou destructive derrière la fente. L'écart entre deux bandes sombres du modèle d'interférence permet de calculer la longueur d'onde de la lumière, la largeur de fente ainsi que la distance par rapport à l'écran d'observation étant connues.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Diode laser rouge de précision	**1003201**
1	Laser vert 532 nm Classe II	**1003202**
1	Banc optique K, 1000 mm	**1009696**
2	Cavalier optique K	**1000862**
1	Fente réglable K	**1008519**
1	Support K pour laser à diode	**1000868**
Autres équipements requis		
	Fil	

GENERALITES

La diffraction de la lumière sur une fente individuelle peut être décrite par la superposition des ondes élémentaires cohérentes qui, selon le principe de Huygens, se propagent dans toutes les directions à partir de la fente éclairée. Dans certaines directions, la superposition provoque une interférence constructive ou destructive. Derrière la fente, on observe à l'écran un système constitué de bandes claires et sombres.

On observe une suppression totale – donc un assombrissement maximal – lorsqu'il existe pour chaque onde élémentaire de la première moitié de fente très précisément une onde élémentaire de la seconde moitié, les deux se supprimant réciproquement. C'est très exactement le cas, lorsque la différence de phase Δs_n entre le rayon central et le rayon marginal est un multiple entier n de la demi-longueur d'onde λ :

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

1

(1) $$\Delta s_n = n \cdot \frac{\lambda}{2} = \frac{b}{2} \cdot \sin\alpha_n$$

$n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$: ordre de diffraction
b : largeur de fente,
α_n : angle de propagation

Les positions de l'assombrissement maximal sont symétriques au rayon primaire (Fig. 1). Son écart – mesuré dans le plan d'observation – par rapport au rayon primaire s'élève à

(2) $$x_n = L \cdot \tan\alpha_n$$

L : écart entre la fente et le plan d'observation

Il en résulte pour de petits angles

(3) $$\alpha_n = x_n = \frac{\lambda \cdot L}{b} \cdot n = \Delta \cdot n \text{ avec } \Delta = \frac{\lambda \cdot L}{b}.$$

Δ : écart relatif des minima

Une fente et une traverse de même largeur sont des objets de diffraction complémentaires. Selon le principe de Babinet, en cas de diffraction sur ces objets, des figures de diffraction identiques se forment à l'extérieur du faisceau lumineux «non perturbé». Dans les deux figures de diffraction, les minima de diffraction se situent par conséquent aux mêmes endroits. L'expérience permet d'étudier la diffraction sur la fente individuelle pour différentes largeurs de fente et longueurs d'onde. Elle montre par ailleurs que la diffraction sur la fente et la traverse de même largeur entraîne des figures de diffraction complémentaires.

EVALUATION

Dans le sens du rayon primaire, la luminosité est maximale. On peut déterminer la grandeur Δ comme une pente de droite, si l'on représente dans un diagramme les écarts x_n en fonction de n. Comme Δ est apparemment inversement proportionnel à la largeur de fente b, on peut entrer dans un diagramme le quotient Δ/L en fonction de $1/b$, pour obtenir la longueur d'onde λ à partir de la pente de droite des données de mesure.

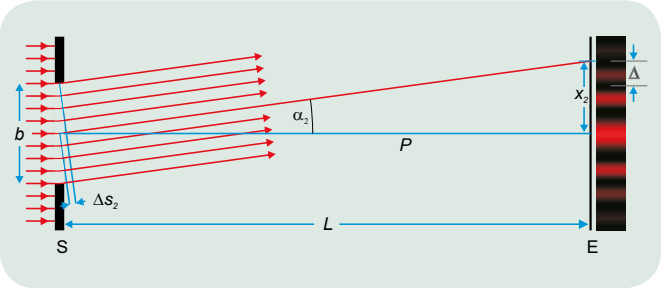


Fig. 1 : Représentation schématique de la diffraction de la lumière sur une fente individuelle (S : fente, b : largeur de fente, E : plan d'observation, P : rayon primaire, L : écart entre l'écran d'observation et la fente, x_2 : écart entre le deuxième minimum et le centre, α_2 : sens d'observation pour le deuxième minimum, Δs_2 : différence de phase entre le rayon central et le rayon marginal).

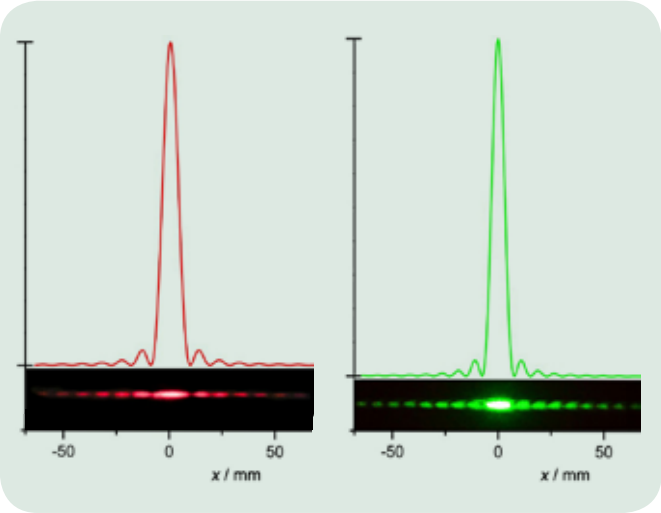


Fig. 2 : Intensité calculée et observée en cas de diffraction sur la fente de largeur 0,3 mm pour λ = 650 nm et pour λ = 532 nm.

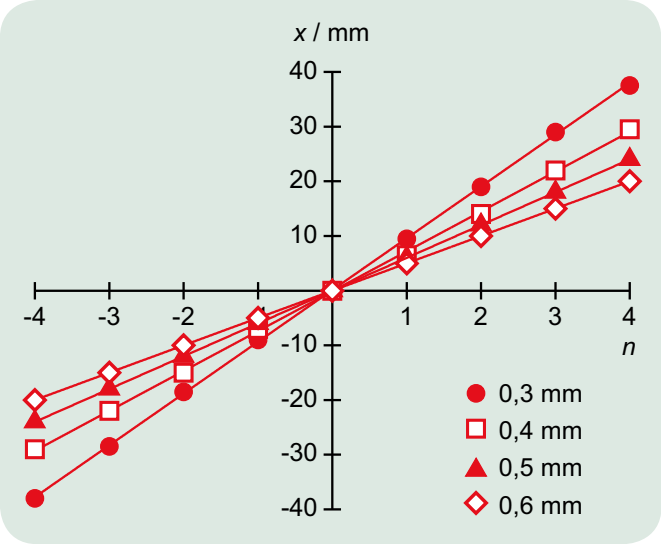


Fig. 3 : Écarts x_n en fonction de l'ordre de diffraction n pour différentes largeurs de fente b pour λ = 650 nm.

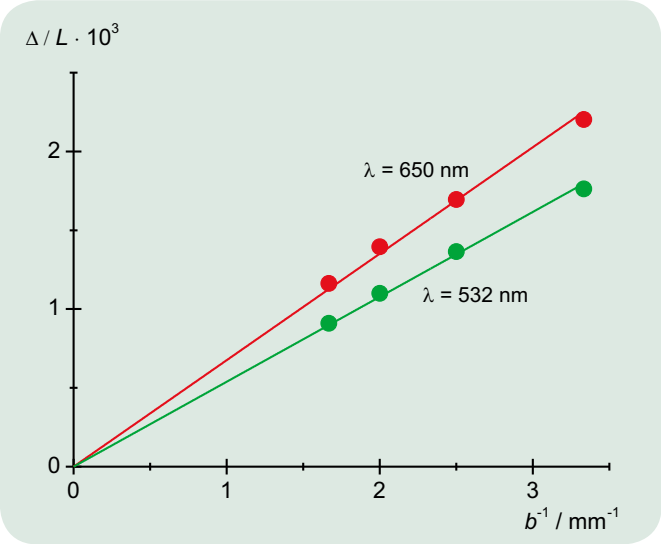
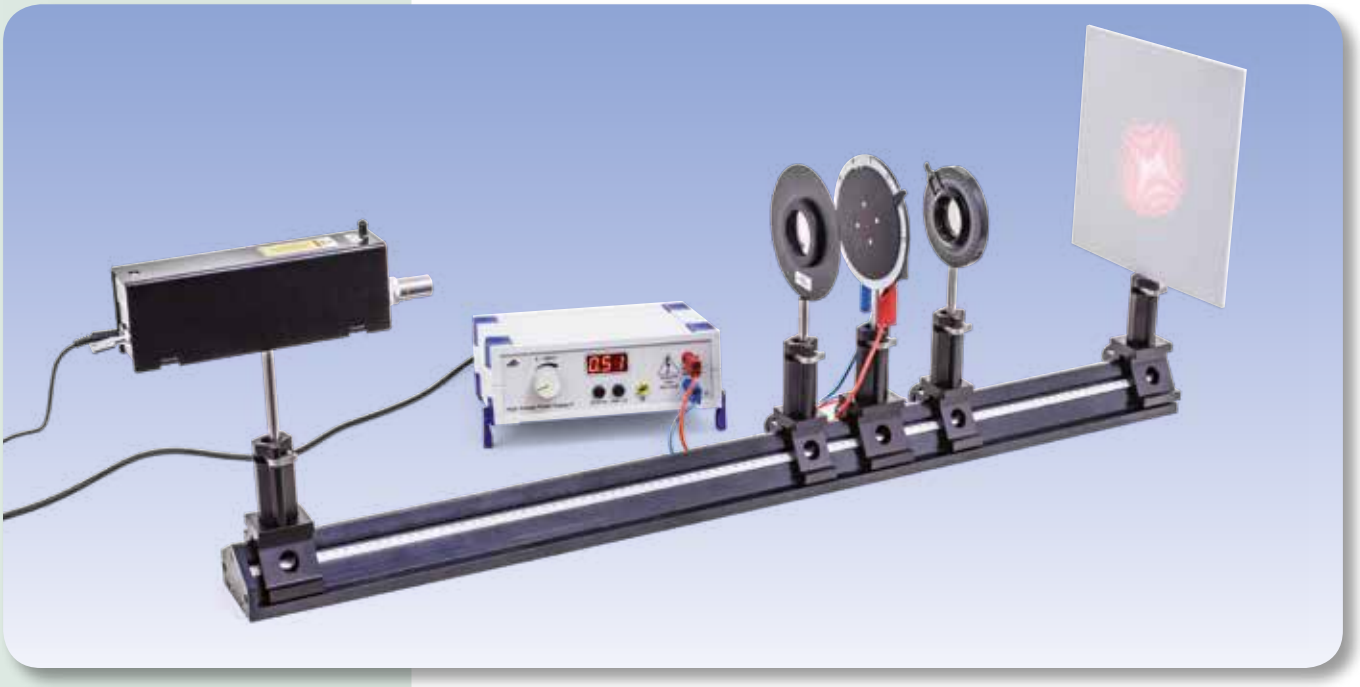


Fig. 4 : Quotient résultant de l'écart relatif Δ des minima et de l'écart L en fonction de la largeur de fente réciproque $1/b$.

UE4040500 EFFET POCKELS



EXERCICES

- **Démontrer la biréfringence dans un trajet conoscopique du rayon**
- **Modifier la biréfringence en appliquant un champ électrique**
- **Déterminer la tension de demi-ondes**

OBJECTIF

Démonstration de l'effet Pockels dans un trajet conoscopique du rayon

RESUME

L'effet Pockels est un effet électro-optique au cours duquel un champ électrique sépare dans une matière appropriée un faisceau lumineux en deux faisceaux partiels polarisés perpendiculairement l'un par rapport à l'autre. Cette capacité à la biréfringence optique repose sur différents indices de réfraction en fonction du sens de propagation et de la polarisation de la lumière. Avec l'effet Pockels, elle augmente de façon linéaire avec l'intensité de champ électrique et elle est démontrée dans l'expérience au moyen d'un cristal en niobate de lithium ($LiNbO_3$) dans un trajet conoscopique du rayon lumineux. L'image d'interférence est formée par deux groupes d'hyperboles qui permettent une lecture directe de la position de l'axe optique de la biréfringence.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Cellule de Pockels sur tige	**1013393**
1	Banc d'optique à section triangulaire D, 1000 mm	**1002628**
3	Cavalier optique D, 90/50	**1002635**
2	Cavalier optique D, 90/36	**1012401**
1	Laser Hélium-Néon	**1003165**
1	Objectif achromatique 10x/ 0,25	**1005408**
1	Filtre de polarisation sur tige	**1008668**
1	Lentille convergente sur tige f = 50 mm	**1003022**
1	Ecran de projection	**1000608**
1	Alimentation haute tension E 5 kV (230 V, 50/60 Hz)	**1013412 ou**
	Alimentation haute tension E 5 kV (115 V, 50/60 Hz)	**1017725**
1	Paire de cordons de sécurité, 75 cm	**1002849**

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

2

GENERALITES

L'effet Pockels est un effet électro-optique au cours duquel un champ électrique sépare dans une matière appropriée un faisceau lumineux en deux faisceaux partiels polarisés perpendiculairement l'un par rapport à l'autre. Cette capacité à la biréfringence optique repose sur différents indices de réfraction en fonction du sens de propagation et de la polarisation de la lumière. Avec l'effet Pockels, elle augmente de façon linéaire avec l'intensité de champ électrique et elle est démontrée dans l'expérience au moyen d'un cristal en niobate de lithium ($LiNbO_3$) dans un trajet conoscopique du rayon lumineux.

À cet effet, le cristal se trouve dans une cellule de Pockels transversale dans laquelle on applique un champ électrique sur le cristal dans le sens de l'axe optique de la biréfringence (Fig. 1). Le rayon lumineux traversant perpendiculairement le cristal est divisé en un rayon partiel ordinaire et un rayon partiel extraordinaire, donc l'un étant polarisé dans le sens de l'axe optique de la biréfringence et l'autre polarisé dans l'axe perpendiculaire au premier. Mesuré pour la longueur d'onde du laser He-Ne λ = 632,8 nm, l'indice de réfraction pour le rayon partiel ordinaire dans le niobate de lithium est n_o = 2,29 et pour le rayon partiel extraordinaire n_e = 2,20. La différence de phase entre les rayons partiels ordinaire et extraordinaire est

(1) $$\Delta = d \cdot (n_o - n_e),$$

d = 20 mm représentant l'épaisseur du cristal dans le sens du rayon.

La démonstration de la biréfringence utilise le trajet classique du rayon qui est proposé dans de nombreux manuels d'optique. On éclaire le cristal avec un faisceau lumineux divergent, polarisé linéairement, puis on observe la lumière derrière un analyseur croisé. L'axe optique de la biréfringence apparaît clairement dans l'image d'interférence, car il se démarque de l'environnement par sa symétrie. Dans l'expérience, il est parallèle à la surface d'entrée et de sortie, aussi l'image d'interférence est-elle constituée de deux groupes d'hyperboles orientés à 90° l'un par rapport à l'autre. L'axe réel du premier groupe d'hyperboles est parallèle, celui du second perpendiculaire à l'axe optique de la biréfringence.
Les bandes sombres des groupes d'hyperboles proviennent de rayons lumineux pour lesquels la différence des trajets optiques des rayons partiels ordinaire et extraordinaire dans le cristal est un multiple entier de la longueur d'onde. Après avoir traversé le cristal, ces rayons lumineux conservent leur polarisation linéaire d'origine et sont effacés par l'analyseur.
La différence de phase correspond à peu près à 2800 longueurs d'onde de la lumière laser utilisée. Toutefois, d'une manière générale, Δ ne représente pas un multiple entier de λ, mais se situe plutôt entre les valeurs $\Delta_m = m \cdot \lambda$ et $\Delta_{m+1} = (m + 1) \cdot \lambda$. Les différences de phase Δ_{m+1}, Δ_{m+2}, Δ_{m+3}, etc., doivent être assignées aux bandes sombres du premier groupe d'hyperboles, les différences de phase Δ_m, Δ_{m-1}, Δ_{m-2}, etc., au second (Fig. 2). La position des bandes sombres, plus précisément l'écart par rapport au centre, dépend de la différence entre Δ et $m \cdot \lambda$. L'effet Pockels augmente ou diminue la différence des principaux indices de réfraction $n_o - n_e$ selon le signe placé devant la tension appliquée. Ainsi, la différence $\Delta - m \cdot \lambda$ est modifiée, de même que la position des bandes d'interférence sombres.
L'application de la tension de demi-onde U_π modifie Δ d'une demi-longueur d'onde. Les bandes d'interférence sombres prennent la place des claires et inversement. La procédure est répétée à chaque fois que la tension est augmentée de la valeur U_π.

EVALUATION

Avec une tension U_1, les bandes sombres se situent très précisément au centre dans l'ordre d'interférence +1, et avec la tension suivante U_2, elles se situent dans l'ordre +2. Dans ce cas, la tension de demi-onde est

$$U_\pi = \frac{U_2 - U_1}{2}$$

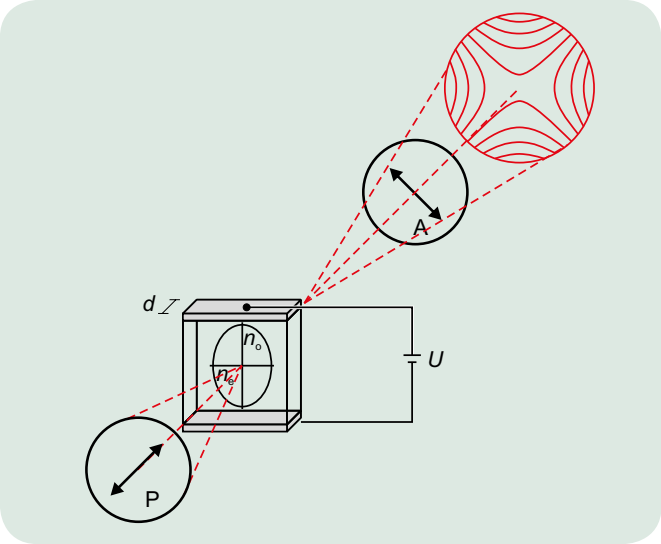


Fig. 1 : Représentation schématique de la cellule de Pockels dans le trajet conoscopique du rayon entre polarisateur et analyseur

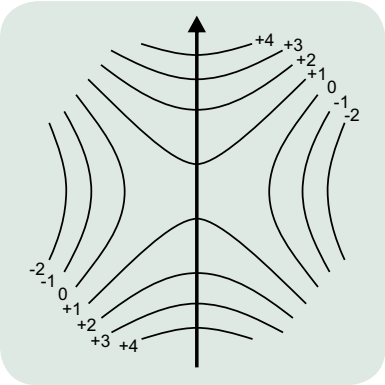


Fig. 2 : Modèle d'interférence avec axe optique du cristal dans le sens de la flèche. L'indexation des bandes d'interférence sombres indiquent la différence de phase entre le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire en unités de longueur d'onde.

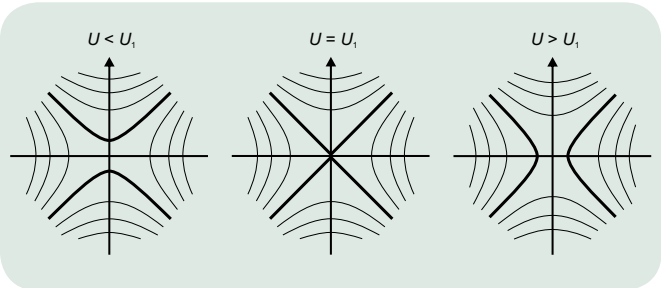


Fig. 3 : Modification du modèle d'interférence par l'effet Pockels. Les hyperboles en gras sont de l'ordre d'interférence +1.

UE4080100 SPECTROMETRE A PRISME

OBJECTIF

Installation et calibrage d'un spectromètre à prisme

RESUME

Dans un spectromètre à prisme, la décomposition en couleurs spectrales de la lumière traversant un prisme est utilisée pour mesurer des spectres optiques. La mesure des longueurs d'onde nécessite un calibrage, car cette dispersion angulaire n'est pas linéaire. Dans l'expérience, on utilise pour le calibrage le spectre « connu » d'une lampe Hg, puis on mesure le spectre « inconnu » d'une lampe Cd.

EXERCICES

- **Ajuster le spectromètre à prisme et effectuer un calibrage avec les raies spectrales d'une lampe Hg.**
- **Mesurer l'angle de déviation minimum à λ = 546,07 nm.**
- **Déterminer l'indice de réfraction du verre flint à λ = 546,07 nm ainsi que les paramètres de Cauchy *b* et *c* de l'indice de réfraction qui dépend de la longueur d'onde.**
- **Calculer une courbe de calibrage d'après la formule de dispersion de Hartmann.**
- **Mesurer un spectre de raies inconnu.**

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Goniomètre de précision	**1002912**
1	Alimentation pour lampes spectrales (230 V, 50/60 Hz)	**1003196 ou**
	Alimentation pour lampes spectrales (115 V, 50/60 Hz)	**1003195**
1	Lampe spectral Hg / Cd	**1003546**
1	Lampe spectral Hg 100	**1003545**

GENERALITES

Avec un spectromètre à prisme, on mesure des spectres optiques en décomposant dans ses couleurs spectrales la lumière qui traverse le prisme. Cette dispersion s'explique par le fait que l'indice de réfraction du prisme dépend de la longueur d'onde. Elle n'est pas linéaire, aussi est-il nécessaire de procéder à un calibrage pour mesurer des longueurs d'onde avec le spectromètre à prisme.

Dans le spectromètre, la lumière étudiée traverse la fente S pour toucher l'objectif O_1 qui, avec la fente, forme un collimateur et génère un large faisceau lumineux parallèle (Fig. 1). Après avoir subi une double réfraction à travers le prisme, le faisceau sortant est parallèle, puis centré dans le plan focal de l'objectif O_2 pour former une image de la fente observée à travers l'oculaire OC. Pour cela, la longue-vue formée par l'objectif O_2 et l'oculaire OC est reliée à un bras orientable fixé au vernier N. La double réfraction de la lumière à travers le prisme permet de décrire les angles α_1, α_2, β_1 et β_2 (Fig. 2). Pour un prisme équilatéral :

(1) $$\sin\alpha_1 = n(\lambda)\cdot\sin\beta_1(\lambda),\ n(\lambda)\cdot\sin\beta_2(\lambda) = \sin\alpha_2(\lambda),\ \beta_1(\lambda)+\beta_2(\lambda) = 60°.$$

On peut modifier l'angle d'entrée α_1 en tournant le prisme dans le faisceau parallèle entrant. Les angles α_2, β_1 et β_2 dépendent de la longueur d'onde λ, car l'indice de réfraction n dépend de la longueur d'onde.
À partir de l'angle d'entrée α_1 et de l'angle de sortie α_2, on obtient l'angle de déviation

(2) $$\delta(\lambda) = \alpha_1 + \alpha_2(\lambda) - 60°$$

entre le collimateur et la longue-vue. Il atteint un minimum δ_{min}, lorsque le rayon est symétrique au prisme. Dans ce cas, la dispersion angulaire $d\delta/d\lambda$ est juste maximale. C'est pourquoi le spectromètre à prisme est ajusté de manière à obtenir un rayon symétrique pour une longueur d'onde de

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

2

référence λ_0. Dans l'expérience, on choisit pour cela la raie spectrale verte (λ_0 = 546,07 nm) d'une lampe spectrale Hg.
L'angle de déviation minimum permet de déterminer l'indice de réfraction du prisme pour la longueur d'onde de référence. Car, en raison de la symétrie, on a $\beta_1(\lambda_0) = \beta_2(\lambda_0) = 30°$ et $\alpha_2(\lambda_0) = \alpha_1$ et ainsi

(3) $$\sin\alpha_1 = n(\lambda_0)\cdot\frac{1}{2} \text{ avec } \alpha_1 = \frac{\delta_{min}}{2} + 30°.$$

Par la dispersion, les autres raies spectrales sont décalées de petits angles $\Delta\delta$ par rapport à δ_{min}. Elles sont lues à la minute d'angle près à l'aide du vernier. Comme la modification Δn de l'indice de réfraction est également faible sur toute l'étendue visible, il suffit d'observer les termes linéaires des modifications. Par conséquent, les équations 1 à 3 permettent d'établir le rapport suivant entre la longueur d'onde et la déviation :

(4) $$\Delta\delta(\lambda) = \Delta\alpha_2(\lambda) = \frac{\Delta n(\lambda)}{\cos\alpha_1} = \frac{\Delta n(\lambda)}{\sqrt{1-\frac{(n(\lambda_0))^2}{4}}}.$$

Dans l'étendue visible du spectre, l'indice de réfraction n diminue au fur et à mesure que la longueur d'onde λ augmente. On peut le décrire avec l'équation de Cauchy sous la forme

(5) $$n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4}.$$

Les équations (4) et (5) permettent une description mathématique pour une courbe de calibrage. Mais la formule de dispersion de Hartmann convient toutefois mieux.

(6) $$\delta(\lambda) = \delta_H + \frac{K}{\lambda - \lambda_H}$$

avec les paramètres d'adaptation δ_H, K et λ_H, qui n'ont toutefois aucune importance physique particulière.
Dans l'expérience, nous utilisons donc les raies spectrales de la lampe Hg en appliquant (6) pour le calibrage, puis pour mesurer les raies d'un spectre « inconnu » (voir tab. 1).

EVALUATION

À partir de l'équation 3, on obtient l'indice de réfraction $n(\lambda_0)$. Les paramètres de Cauchy de l'indice de réfraction peuvent être calculés dans la représentation $\Delta n = n(\lambda) - n(\lambda_0) = f(1/\lambda^2)$ à partir d'une adaptation des paraboles.

Tab.1: Longitudes de onda de las líneas espectrales del Cd

Denonación	Medición λ / nm	Valor bibliográfico λ / nm
azul (medio)	466	466
azul (fuerte)	468	468
verde azul (medio)	479	480
verde oscuro (fuerte)	509	509
verde oscuro (débil)	515	516
rojo (fuerte)	649	644

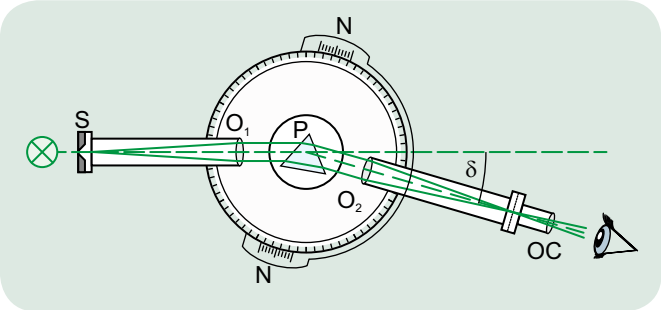


Fig. 1 : Représentation schématique d'un spectromètre à prisme.
S : fente d'entrée, O_1 : objectif du collimateur, P : prisme, O_2 : objectif de la longue-vue, OC : oculaire de la longue-vue, δ : déviation

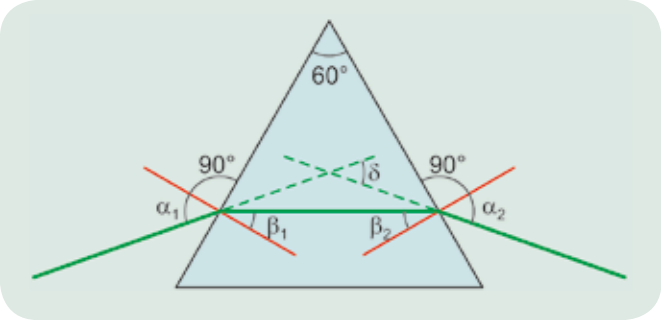


Fig. 2 : Rayon dans le prisme

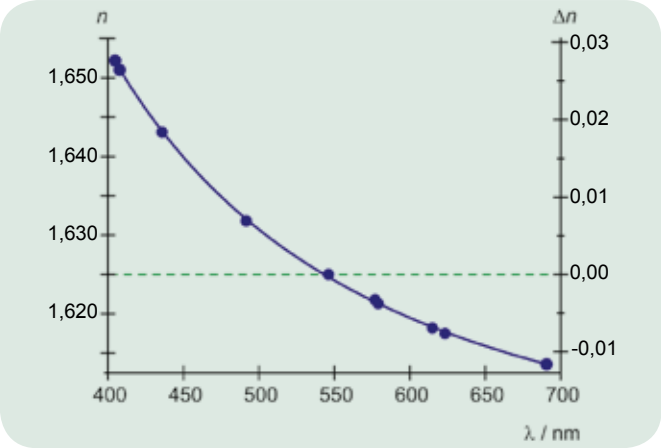


Fig. 3 : Indice de réfraction dépendant de la longueur d'onde du prisme en verre flint

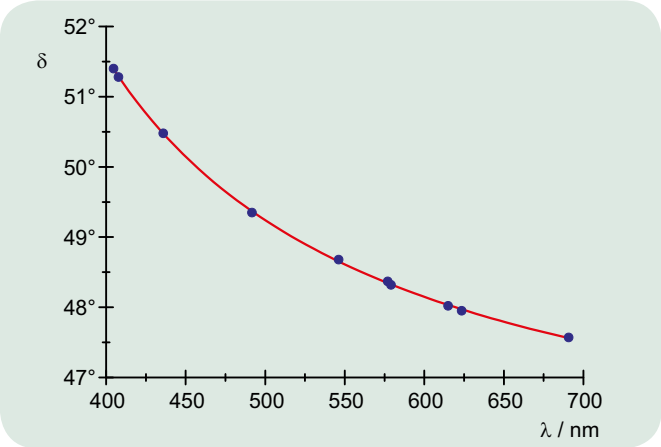


Fig. 4 : Courbe de calibrage du spectromètre à prisme

UE5010400 EXPERIENCE DE MILLIKAN

OBJECTIF

Confirmer la valeur de la charge élémentaire à l'aide de gouttelettes d'huile chargées d'après Millikan

RESUME

Dans les années 1910 à 1913, *Robert Andrews Millikan* réussit à déterminer la charge élémentaire avec une précision alors inégalée et ainsi à confirmer la quantification des charges. L'expérience qui porte son nom repose sur la mesure de la quantité de charges de gouttelettes d'huile chargées qui montent dans l'air dans le champ électrique d'un condensateur à plaques et qui descendent sans champ électrique. Utilisé dans cette expérience, l'appareil de Millikan est un dispositif compact reposant sur le montage expérimental de Millikan, mais qui se passe de source de rayonnement radioactif.

EXERCICES

- **Générer et sélectionner des gouttelettes d'huile chargées appropriées et les observer dans le champ électrique**
- **Mesurer la vitesse de montée dans le champ électrique et la vitesse de descente sans champ électrique**
- **Confirmer la valeur de la charge élémentaire**

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Appareil de Millikan (230 V, 50/60 Hz)	**1018884 ou**
	Appareil de Millikan (115 V, 50/60 Hz)	**1018882**

NOTIONS DE BASE GENERALES

Dans les années 1910 à 1913, *Robert Andrews Millikan* réussit à déterminer la charge élémentaire avec une précision alors inégalée et ainsi à confirmer la quantification des charges, ce qui lui valut d'obtenir le prix Nobel de physique. L'expérience qui porte son nom repose sur la mesure de la quantité de charges de gouttelettes d'huile chargées qui montent dans l'air dans le champ électrique d'un condensateur à plaques et qui descendent sans champ électrique. La valeur $e = (1{,}592 \pm 0{,}003)\cdot 10^{-19}$ C qu'il a déterminée ne diverge que de 0,6 % de la valeur connue de nos jours.

Les forces qui agissent sur une gouttelette d'huile considérée sphérique et se trouvant dans l'air dans le champ électrique d'un condensateur à plaques sont : le poids

(1) $$F_G = m_2 \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_0^3 \cdot \rho_2 \cdot g,$$

m_2 : masse de la gouttelettes d'huile, r_0 : rayon de la gouttelettes d'huile,
ρ_2 : densité d'huile, g : accélération de la pesanteur

la force ascensionnelle dans l'air,

(2) $$F_A = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_0^3 \cdot \rho_1 \cdot g,$$

ρ_1 : densité de l'air

la force dans le champ électrique E,

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

2

(3) $$F_E = q_0 \cdot E = \frac{q_0 \cdot U}{d},$$

q_0 : charge de la gouttelette d'huile,
U : tension électrique appliquée entre les plaques de condensateur,
d : écart des plaques de condensateur

et la force de frottement de Stokes

(4) $$F_{R1,2} = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r_0 \cdot v_{1,2}.$$

η: viscosité de l'air, v_1 : vitesse de montée, v_2 : vitesse de descente

Lorsque la gouttelette d'huile monte dans le champ électrique, les forces s'équilibrent

(5) $$F_G + F_{R1} = F_E + F_A$$

et en cas de descente sans champ électrique

(6) $$F_G = F_{R2} + F_A.$$

Pour le rayon et la charge de la gouttelette d'huile, il en résulte :

(7) $$r_0 = \sqrt{\frac{9}{2} \cdot \frac{\eta \cdot v_2}{(\rho_2 - \rho_1) \cdot g}}$$

et

(8) $$q_0 = \frac{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d \cdot (v_1 + v_2)}{U} \cdot r_0.$$

Les très petits rayons r_0 se situent dans l'ordre de grandeur de la longueur de parcours libre moyenne de la molécule d'air, de sorte qu'il faut corriger la force de frottement de Stokes. Pour le rayon corrigé r et la charge corrigée q, il en résulte :

(9) $$r = \sqrt{r_0^2 + \frac{A^2}{4}} - \frac{A}{2} \quad \text{avec} \quad A = \frac{b}{p}$$

b = 82 µm•hPa = constant, p : pression d'air

(10) $$q = q_0 \cdot \left(1 + \frac{A}{r}\right)^{-1,5}.$$

Utilisé dans cette expérience, l'appareil de Millikan est un dispositif compact reposant sur le montage expérimental de Millikan, mais qui se passe de source de rayonnement radioactif. Les gouttelettes d'huile chargées sont générées par un pulvérisateur d'huile et, par la suite, leur état de charge aléatoire n'est plus influencé de l'extérieur. Tout comme dans le montage de Millikan, les gouttelettes d'huile sont alimentées par le haut dans la chambre d'expérimentation. L'observation avec un microscope de mesure permet de sélectionner et de déterminer la charge de gouttelettes d'huile appropriées. Pour chaque gouttelette d'huile, on détermine le temps de montée en présence d'un champ électrique et le temps de descente en l'absence d'un champ électrique pour un parcours entre deux repères choisis sur le réticule gradué. La polarité des plaques à condensateur est choisie en fonction du signe de la charge. Comme variante, on peut maintenir en suspension dans le champ électrique les gouttelettes d'huile à mesurer.
Le temps de montée et de descente mesuré d'une gouttelette d'huile chargée, la tension électrique réglée ainsi que des paramètres significatifs pour l'évaluation (température, viscosité et pression) s'affichent à l'écran tactile.

EVALUATION

Les temps de montée et de descente mesurés t_1 et t_2 permettent de déterminer les vitesses de montée et de descente

$$v_{1,2} = \frac{s}{V \cdot t_{1,2}},$$

s : distance entre deux repères sélectionnés sur le réticule gradué,
V = 2 : agrandissement d'objectif

et, selon l'équation (10), la charge q de la gouttelette d'huile.
Les charges q_i déterminées à partir des mesures (Tab. 1) sont divisées par un nombre entier n_i de sorte que les valeurs qui en résultent présentent la plus petite dispersion possible autour de la moyenne. L'écart standard sert de référence à la dispersion. On détermine la meilleure estimation e pour la charge élémentaire ainsi que l'erreur standard Δe à partir des valeurs e_i des différentes mesures et de leurs erreurs de mesure Δe_i (Tab. 1) en formant la moyenne pondérée de la manière suivante :

$$e \pm \Delta e = \frac{\sum w_i \cdot e_i}{\sum w_i} \pm \frac{1}{\sqrt{\sum w_i}} \quad \text{avec} \quad w_i = \left(\frac{1}{\Delta e_i}\right)^2.$$

Avec les valeurs du Tab. 1, il en résulte :

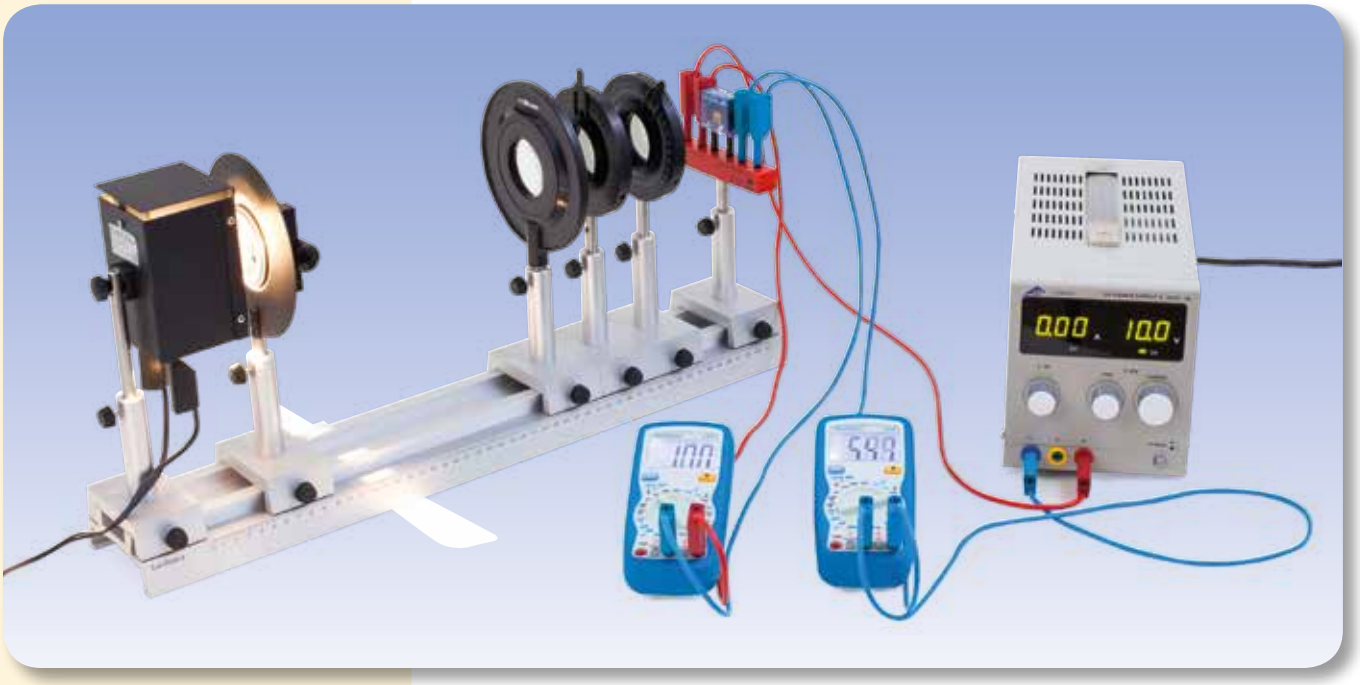
$$e \pm \Delta e = \frac{1286}{799} \pm \frac{1}{28} = (1{,}61 \pm 0{,}04) \cdot 10^{-19}\ \text{C}.$$

Plus on enregistre de valeurs de mesure, plus le résultat est pertinent. Autrement dit, plus l'échantillon est volumineux, plus le nombre n de charges sur les gouttelettes d'huile est petit. En raison des imprécisions, notamment de l'écart des plaques à condensateur et de la lecture sur la graduation du microscope, il est recommandé d'avoir $n \leq 7$.

Tab. 1 : Charges mesurées q_i de dix gouttelettes d'huile différentes et valeur e_i qui en résulte pour la charge élémentaire

i	Polarité	q_i 10^{-19} C	Δq_i 10^{-19} C	n	e_i 10^{-19} C	Δe_i 10^{-19} C
1	+ / −	-11,1	0,9	-7	1,59	0,13
2	+ / −	-7,9	0,6	-5	1,58	0,12
3	+ / −	-6,2	0,4	-4	1,55	0,10
4	− / +	3,5	0,2	2	1,75	0,10
5	− / +	4,9	0,3	3	1,63	0,10
6	− / +	6,3	0,5	4	1,58	0,13
7	− / +	6,6	0,4	4	1,65	0,10
8	− / +	7,6	0,6	5	1,52	0,12
9	− / +	10,2	0,8	6	1,70	0,13
10	− / +	10,6	0,8	7	1,51	0,11

UE6020400 PHOTOCONDUCTION



EXERCICES

- **Mesurer le courant en fonction de la tension à différentes intensités de rayonnement**
- **Mesurer le courant en fonction de l'intensité de rayonnement à différentes tensions**

OBJECTIF

Relevé des caractéristiques d'une photorésistance

RESUME

La photoconduction profite de l'absorption de la lumière par l'effet photoélectrique intérieur dans un semi-conducteur pour libérer des paires libres constituées d'électrons et de trous. Utilisé pour fabriquer des photorésistances, le sulfure de cadmium est un mélange spécial de semi-conducteurs qui présente un effet photoélectrique intérieur particulièrement puissant. Dans l'expérience, une photorésistance CdS est éclairée par la lumière blanche d'une lampe à incandescence, dont on peut varier l'intensité de rayonnement à l'emplacement de la photorésistance en croisant deux filtres de polarisation montés l'un derrière l'autre.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	Banc optique U, 600 mm	**1003040**
6	Cavalier optique U, 75 mm	**1003041**
1	Source lumineuse halogène 50 W	**1003038**
1	Fente réglable sur tige	**1000856**
1	Lentille convergente sur tige f = 150 mm	**1003024**
2	Filtre de polarisation sur tige	**1008668**
1	Support pour éléments enfichables	**1018449**
1	Alimentation CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	**1003312 ou**
	Alimentation CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	**1003311**
2	Multimètre numérique P1035	**1002781**
3	Paire de cordons de sécurité, 75 cm, rouge/bleu	**1017718**

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

2

GENERALITES

La photoconduction profite de l'absorption de la lumière par l'effet photoélectrique intérieur dans un semi-conducteur pour libérer des paires libres constituées d'électrons et de trous. Les transitions vers les défauts dominent dans certains semi-conducteurs. L'effet dépend alors non seulement de la matière de base, mais aussi de sa microstructure et des impuretés. L'ionisation des défauts agit pendant quelques millisecondes comme un dopage et augmente la conductivité électrique de la matière. Utilisé pour fabriquer des photorésistances, le sulfure de cadmium est un mélange spécial de semi-conducteurs qui présente un effet photoélectrique intérieur particulièrement puissant.

L'absorption de lumière augmente la conductivité du semi-conducteur de

(1) . $$\Delta\sigma = \Delta p \cdot e \cdot \mu_p + \Delta n \cdot e \cdot \mu_n$$

e : charge élémentaire,
Δn : modification de la concentration d'électrons,
Δp : modification de la concentration de trous,
μ_n : mobilité des électrons,
μ_p : mobilité des trous.

Lorsque la tension U est appliquée, le courant photoélectrique suivant circule :

(2) . $$I_{Ph} = U \cdot \Delta\sigma \cdot \frac{A}{d}$$

A : section du trajet de courant, d: longueur du trajet de courant.

Dans un circuit électrique, le semi-conducteur agit donc comme une résistance dépendante de la lumière, dont la valeur diminue avec l'incidence de la lumière. Le rapport avec l'intensité de rayonnement Φ à tension constante peut être décrit sous la forme suivante :

(3) $$I_{Ph} = a \cdot \Phi^{\gamma} \text{ avec } \gamma \leq 1$$

γ renseignant sur les processus de recombinaison dans la matière semi-conductrice.
Dans l'expérience, une photorésistance CdS est éclairée par la lumière blanche d'une lampe à incandescence. À intensité de rayonnement constante Φ, on mesure le rapport entre le courant I et la tension appliquée U et, à tension constante U, le rapport entre le courant I et l'intensité de rayonnement Φ, cette dernière pouvant être variée en croisant deux filtres de polarisation montés l'un derrière l'autre.
Un dépassement d'une perte en puissance maximale de 0,2 W détruit la photorésistance. C'est pourquoi, dans l'expérience, l'intensité lumineuse incidente est limitée par une fente réglable se trouvant juste derrière la source lumineuse.

EVALUATION

Les caractéristiques courant-tension de la photorésistance CdS coïncident avec (2) sur une droite passant par l'origine.
Pour la description des caractéristiques courant-intensité de rayonnement, le terme $\cos^2\alpha$ est calculé comme mesure relative pour l'intensité de rayonnement, α représentant l'angle entre les sens de polarisation des deux filtres. Cependant, les filtres de polarisation ne sont pas entièrement effacés, même en position croisée. De plus, il est impossible d'éviter totalement une luminosité résiduelle dans la salle d'expérimentation. C'est pourquoi (3) est modifiée pour devenir

$$I = a \cdot \Phi^{\gamma} + b \text{ avec } \gamma \leq 1$$

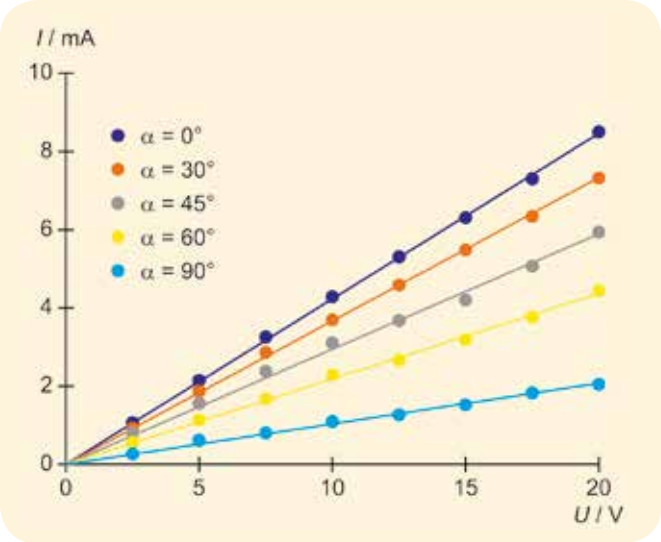


Fig. 1 : Caractéristiques courant-tension de la photorésistance CdS à différentes intensités de rayonnement

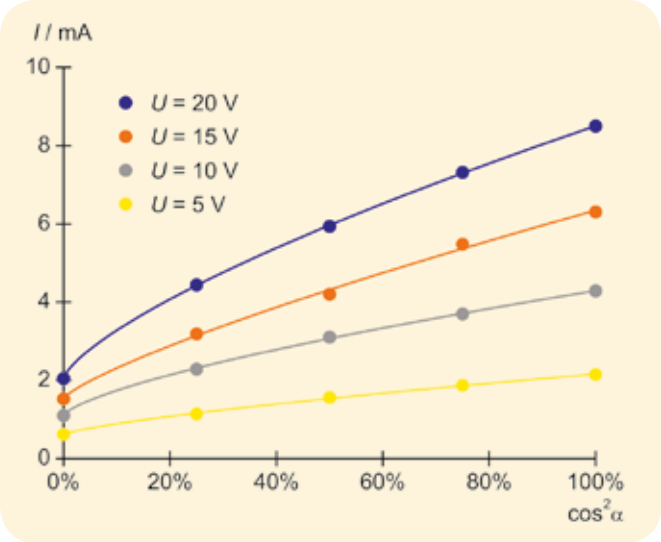


Fig. 2 : Caractéristiques courant-intensité de rayonnement de la photorésistance CdS à différentes tensions

UE8020100 INSTALLATIONS PHOTOVOLTAIQUES

OBJECTIF

Mesure des caractéristiques d'un module photovoltaïque en fonction de l'intensité de l'éclairement lumineux

EXERCICES

- **Mesure des caractéristiques *I-U* d'un module photovoltaïque à différents éclairements lumineux**
- **Comparaison entre les caractéristiques mesurées et le calcul selon le modèle mono-diode**
- **Détermination du rapport entre la tension à vide et le courant de court-circuit à différents éclairements lumineux**

RESUME

Une installation photovoltaïque transforme l'énergie lumineuse de la lumière du soleil en énergie électrique, en utilisant des cellules solaires constituées par ex. de silicium dopé et correspondant dans leur principe à une photodiode de grande surface. La lumière absorbée dans la cellule solaire détache des porteurs de charge qui proviennent des liaisons cristallines et qui contribuent ainsi à un courant photoélectrique dans le sens passant opposé de la jonction p-n. Le courant pouvant être cédé à une charge extérieure est limité par le courant de diode de la cellule solaire. À la tension à vide U_{OC}, il atteint la valeur zéro, car le courant photoélectrique et le courant de diode y sont parfaitement compensés, et devient négatif dès qu'une tension est appliquée au-dessus de la tension à vide. Dans le domaine des courants positifs, la cellule solaire peut être exploitée comme un générateur pour céder de l'énergie électrique à une charge extérieure. Dans l'expérience, les caractéristiques courant/tension de ce générateur sont mesurées en fonction de l'éclairement lumineux et décrites avec un jeu de paramètres simple.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	SEE Énergie solaire (230 V, 50/60 Hz)	**1017732 ou**
	SEE Énergie solaire (115 V, 50/60 Hz)	**1017731**
1	Alimentation CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	**1003312 ou**
	Alimentation CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	**1003311**

GENERALITES

Le terme « photovoltaïque » est composé du mot grec phos (lumière) et du nom italien Volta. Il honore *Allessandro Volta*, qui a inventé, entre autres, la première batterie électrochimique opérationnelle. Une installation photovoltaïque transforme de l'énergie lumineuse « gratuite » provenant de la lumière du soleil en énergie électrique et sans émettre de CO_2, en utilisant des cellules solaires constituées dans la majeure partie des cas de silicium dopé et correspondant à une photodiode de grande surface. La lumière absorbée dans la cellule solaire détache des porteurs de charge issus des liaisons cristallines (effet photoélectrique intérieur) qui, dans le champ électrique de la jonction p-n obtenu par le dopage, accèdent aux contacts extérieurs de la cellule solaire, les électrons vers le côté dopé n et les trous vers le côté dopé p (Fig. 1). Il se forme ainsi un courant photoélectrique dans le sens passant opposé de la jonction p-n, qui peut céder de l'énergie électrique à une charge extérieure.

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

1

Le courant photoélectrique I_{Ph} est proportionnel à l'éclairement lumineux Φ :

(1) $$I_{Ph} = \text{const} \cdot \Phi$$

Il est superposé par le courant de diode dans le sens passant

(2) $$I_D = I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{U_T} \right) - 1 \right)$$

I_S : courant de saturation, U_T : tension de température

et augmente d'autant plus que la tension U développée entre les connexion dépasse la tension de diffusion U_D. Ainsi, le courant I cédé à l'extérieur est limité par le courant de diode :

(3) $$I = I_{Ph} - I_D = I_{Ph} - I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{U_T} \right) - 1 \right)$$

À la tension à vide U_{OC}, il atteint la valeur zéro, car le courant photoélectrique et le courant de diode y sont parfaitement compensés, et devient négatif dès qu'une tension $U > U_{OC}$ est appliquée.
Dans le domaine des courants positifs, la cellule solaire peut être exploitée comme un générateur pour céder de l'énergie électrique à une charge extérieure. L'équation (3) décrit la caractéristique *I-U* de ce générateur.
Dans la pratique, le courant photoélectrique I_{Ph} étant bien plus important que le courant de saturation I_S, l'équation (3) permet de déduire pour la tension à vide le rapport

(4) $$U_{OC} = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{Ph}}{I_S} \right).$$

Si la cellule solaire est court-circuitée au niveau de ses connexions, elle fournit le courant de court-circuit I_{SC} qui, étant donné que $U = 0$, correspond au courant photoélectrique en raison de (3). Par conséquent

(5) $$U_{OC} = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_S} \right), \text{ avec } I_{SC} = I_{Ph}$$

L'équation 2 décrit le comportement de la diode dans le cadre du modèle dit standard. Dans ce cas, le courant de saturation I_S est une grandeur matérielle qui dépend des données géométriques et électriques de la cellule solaire. Pour la tension de température U_T :

(6) $$U_T = \frac{m \cdot k \cdot T}{e}$$

$m = 1 \ldots 2$: facteur d'idéalité
k : constante de Boltzmann, e : charge élémentaire,
T : température en kelvins

Si l'on observe la caractéristique de plus près, il faut encore tenir compte des courants de fuite sur les bords de la cellule solaire et des courts-circuits ponctuels de la jonction p-n, qu'on peut modéliser avec une résistance parallèle R_P. L'équation 3 devient

(7) $$I = I_{Ph} - I_S \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{U_T} \right) - 1 \right) - \frac{U}{R_P}$$

Dans la pratique, pour obtenir de bonnes tensions utiles entre 20 et 50 V, on monte plusieurs cellules solaires en série dans un module photovoltaïque. Dans l'expérience, un tel circuit série constitué de 18 cellules solaires est éclairé par une lampe halogène d'éclairement lumineux variable, permettant ainsi d'enregistrer les caractéristiques courant/tension du module à différents éclairements.

EVALUATION

On peut décrire les caractéristiques courant/tension du module photovoltaïque (Fig. 2) à l'aide de l'équation 7, en utilisant toujours le même jeu de paramètres I_S, U_T et R_P indépendamment de l'éclairement lumineux et le courant photoélectrique I_{PH} selon l'éclairement lumineux. Cependant, la tension de température est 18 fois supérieure à la valeur évaluée dans l'équation 6, car le module se présente sous la forme d'un circuit série de 18 cellules solaires.
Comme schéma équivalent pour le module photovoltaïque, on peut donc indiquer un circuit parallèle constitué d'une source de courant idéale, d'un circuit série de 18 diodes semi-conductrices et d'une résistance ohmique (Fig. 3). Dans le sens bloquant, la source de courant fournit un courant qui dépend de l'éclairement lumineux.

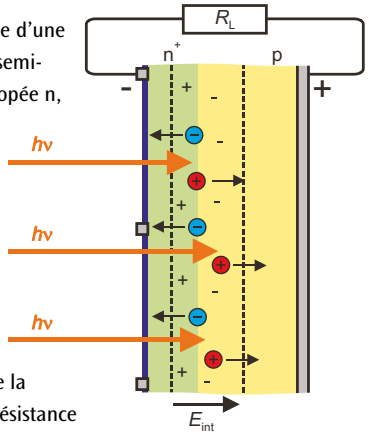


Fig. 1 : Représentation schématique d'une cellule solaire comme composant semi-conducteur, n+ : zone fortement dopée n, p : zone dopée p,
⊕ : trou généré par absorption de lumière,
⊖ : électron libre généré par absorption de lumière,
+ : charge positive « stationnaire »,
- : charge négative « stationnaire »,
E_{int} : champ électrique résultant de la différence de charge d'espace, R_L-résistance de charge

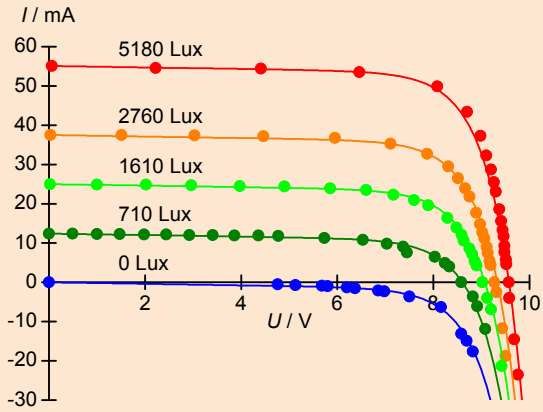


Fig. 2 : Caractéristiques courant/tension d'un module photovoltaïque à cinq éclairements lumineux différents

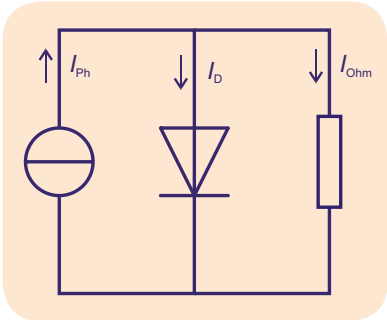


Fig. 3 : Schéma équivalent pour le module photovoltaïque

UE8020200 INSTALLATIONS PHOTOVOLTAIQUES

OBJECTIF

Étude de l'influence d'un ombrage partiel

EXERCICES

- **Mesurer et analyser les caractéristiques *I/U* et *P/R* du circuit série constitué de deux modules photovoltaïques.**
- **Mesurer et analyser les caractéristiques en cas d'ombrage partiel avec et sans protection par des diodes bypass.**
- **Démontrer la tension de blocage sur le module ombragé non protégé.**
- **Déterminer les pertes de puissance résultant d'un ombrage partiel.**

RESUME

Dans les installations photovoltaïques, on pose habituellement plusieurs modules en série. Les modules, quant à eux, sont des circuits série constitués de nombreuses cellules solaires. Dans la pratique, on observe des ombrages partiels. Certains éléments de l'installation sont alors éclairés avec une intensité moindre et ne fournissent qu'un faible courant photoélectrique qui limite le courant à travers tout le circuit série. On évite cette situation en utilisant des diodes bypass. Dans l'expérience, deux modules constitués chacun de 18 cellules solaires représentent une installation photovoltaïque simple. Ils sont montés en série au choix avec ou sans des diodes bypass supplémentaires et éclairés avec la lumière provenant d'une lampe halogène.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	SEE Énergie solaire (230 V, 50/60 Hz)	**1017732 ou**
	SEE Énergie solaire (115 V, 50/60 Hz)	**1017731**

NOTIONS DE BASE GENERALES

Dans les installations photovoltaïques, on pose habituellement plusieurs modules en série. Les modules, quant à eux, sont des circuits série constitués de nombreuses cellules solaires.

On calcule le courant et la tension dans un tel circuit série à l'aide des lois de Kirchhoff en tenant compte de la caractéristique courant/tension des cellules solaires. Le même courant *I* traverse tous les modules du circuit série

(1) $$U = \sum_{i=1}^{n} U_i$$

n : nombre de modules

et la tension totale est la somme de toutes les tensions U_i qui passent entre les connexions des différents modules. On peut très bien décrire la caractéristique courant/tension d'une cellule solaire ou d'un module individuel en s'appuyant sur un circuit équivalent faisant office de circuit antiparallèle et composé d'une source de courant constant qui fournit le courant photoélectrique et d'une « diode semiconductrice ». Les pertes ohmiques correspondent à une résistance parallèle supplémentaire (cf. l'expérience UE8020100 et la Fig. 1). Le courant photoélectrique est proportionnel à l'intensité de rayonnement de la lumière. À intensité de rayonnement égale, tous les modules présentent le même comportement et fournissent la même tension individuelle. Dans ce cas, on obtient à partir de l'équation 1 :

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

1

(2) $$U = n \cdot U_1$$

Mais dans la pratique, une installation photovoltaïque peut subir un ombrage partiel. Certains modules de l'installation sont alors éclairés avec une intensité moindre et ne fournissent qu'un faible courant photoélectrique qui limite le courant à travers tout le circuit série. Cette limitation de courant a pour effet que différentes tensions U_i apparaissent sur les différents modules.

Dans le pire des cas, les tensions sur les modules totalement éclairés atteignent même en cas de court-circuit ($U = 0$) des valeurs allant jusqu'à la tension à vide (Fig. 2). Dans le sens du blocage, la somme de ces tensions est appliquée aux modules ombragés. Le fort réchauffement qui s'ensuit risque de détruire l'encapsulation, voire même les cellules solaires. Des diodes bypass, capables de faire passer le courant par l'élément ombragé, protègent les installations photovoltaïques.

Dans l'expérience, deux modules constitués chacun de 18 cellules solaires représentent une installation photovoltaïque simple. Ils sont montés en série au choix avec ou sans des diodes bypass supplémentaires et éclairés avec la lumière provenant d'une lampe halogène. Dans un premier temps, les deux modules sont éclairés avec la même intensité. Puis on ombrage l'un des deux modules, de sorte qu'il ne fournisse plus que la moitié du courant photoélectrique.

Dans tous les cas, les caractéristique *I/U* sont enregistrées et comparées, du court-circuit jusqu'à la tension à vide. De plus, les puissances sont calculées comme fonctions de la résistance de charge afin de déterminer les pertes de puissance dues à l'ombrage et l'influence des diodes bypass. Par ailleurs, en cas de court-circuit, la tension est mesurée sur le module ombragé. Elle atteint -9 V si le module n'est pas protégé par une diode bypass.

EVALUATION

Par exemple, si un module ne fournit que la moitié du courant photoélectrique, celui-ci détermine le courant de court-circuit du circuit série en l'absence de diode bypass.

Avec une diode bypass, le module totalement éclairé fournit son courant maximum, jusqu'à ce que celui-ci diminue parce que la tension à vide du module individuel est atteinte.

Le modèle mathématique permettant d'adapter les valeurs de mesure dans les Fig. 3 et 4 tient compte des lois de Kirchhoff et utilise la caractéristique courant/tension (déterminée dans l'expérience UE8020100) des différents modules avec les paramètres I_S, U_T et R_P. Pour tenir compte des diodes bypass, on utilise la caractéristique de ces dernières.

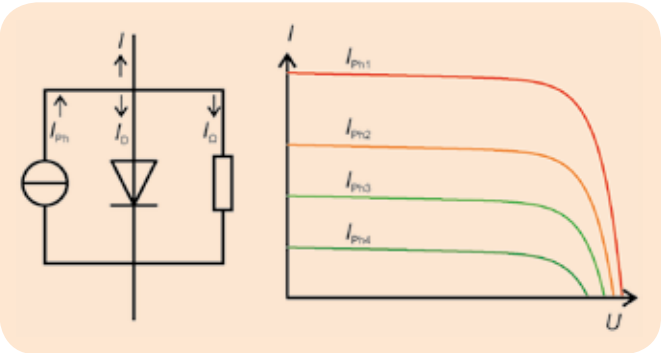


Fig. 1 : Schéma équivalent et caractéristiques d'une cellule solaire

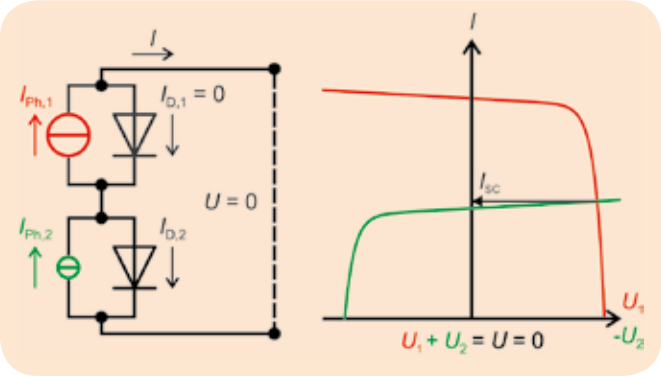


Fig. 2 : Représentation schématique d'un ombrage partiel du circuit série constitué de deux modules sans bypass, en cas de court-circuit ($U = 0$). La caractéristique du module ombragé (vert) est représentée réfléchie. Ici, on observe une tension U_2 dans le sens du blocage.

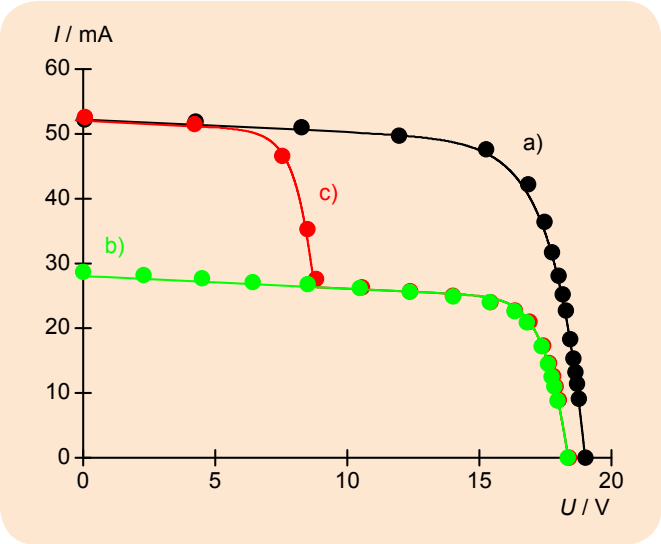


Fig. 3 : Caractéristique *I/U* du circuit série constitué de deux modules : a) sans ombrage, b) ombrage partiel, sans bypass, c) ombrage partiel, avec bypass

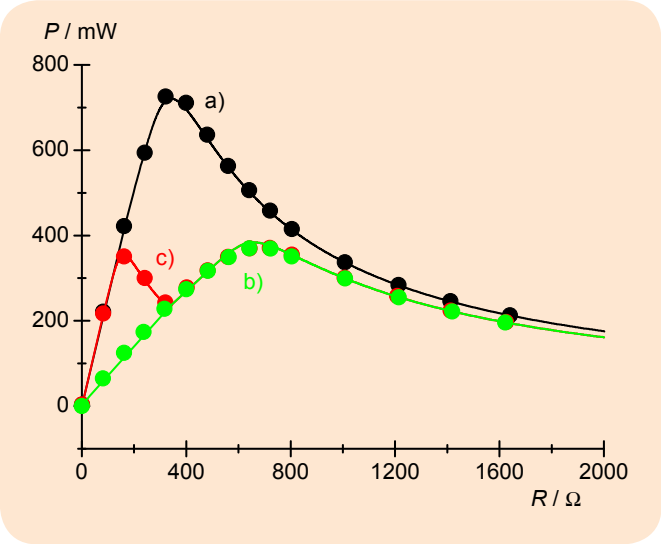
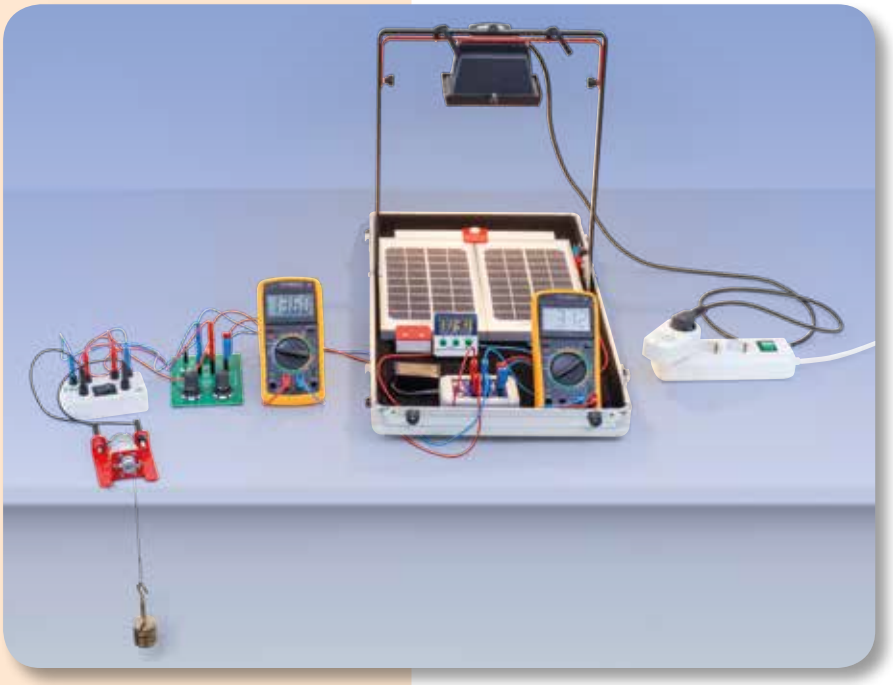


Fig. 4 : Caractéristique *P/R* du circuit série constitué de deux modules : a) sans ombrage, b) ombrage partiel, sans bypass, c) ombrage partiel, avec bypass

UE8020250 INSTALLATIONS PHOTOVOLTAIQUES



OBJECTIF

Étude d'une installation autonome permettant de produire et de stocker de l'énergie électrique

EXERCICES

- **Détermination du courant de service du compteur de charges électronique et de l'éclairement lumineux minimal requis pour le service**
- **Étude du bilan énergétique de l'installation autonome à différentes charges ohmiques et différents éclairements lumineux en laboratoire**
- **Mesure du courant solaire fourni ainsi que du courant de charge et de décharge en fonction du courant débité à différents éclairements lumineux**

Vous trouverez les informations techniques sur les appareils sur « 3bscientific.com »

1

RESUME

Les installations autonomes sont des équipements d'alimentation électrique qui ne sont pas connectés à un réseau électrique public et comprennent la production et le stockage d'énergie électrique. Souvent, on utilise des modules photovoltaïques pour produire de l'énergie et des accumulateurs pour en stocker. Pour reproduire une telle installation autonome, l'expérience utilise deux modules photovoltaïques pour charger un accumulateur à hydrure métallique de nickel. Un moteur à courant continu est connecté pour décharger l'accumulateur, tandis qu'un compteur de charges électronique mesure la charge arrivante ou partante. Le montage en série de deux modules permet d'obtenir une charge fiable de l'accumulateur même à faible éclairement lumineux, car la tension à vide se situe nettement au-dessous de la tension de l'accumulateur.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

Nombre	Appareil	Référence
1	SEE Énergie solaire (230 V, 50/60 Hz)	**1017732 ou**
	SEE Énergie solaire (115 V, 50/60 Hz)	**1017731**
1	Compteur de charges avec accumulateur	**1017734**
1	Motoréducteur à poulie	**1017735**
1	Jeu de masses à fente 5 x 100 g	**1018597**
1	Ficell, 100 m	**1007112**
1	Interrupteur bipolaire	**1018439**
1	Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 1 mm²	**1002840**
1	Compteur horaire	**1003009**

GENERALITES

Les installations autonomes sont des équipements d'alimentation électrique qui ne sont pas connectés à un réseau électrique public. Elles comprennent la production et le stockage d'énergie électrique et sont utilisées lorsqu'une connexion à un réseau public n'est pas possible ou n'est pas rentable ou n'offre ni flexibilité, ni mobilité suffisantes. Souvent, on utilise des modules photovoltaïques pour produire de l'énergie et des accumulateurs pour en stocker. Pour reproduire une telle installation autonome, l'expérience utilise deux modules photovoltaïques d'une puissance nominale de 5 W pour charger un accumulateur à hydrure métallique de nickel d'une

capacité de 220 mAh. Un moteur à courant continu est connecté pour décharger l'accumulateur, tandis qu'un compteur de charges électronique mesure la charge arrivante ou partante. L'expérience renonce au régulateur de charge utilisé généralement dans la pratique.

La tension nominale U_{Accu} de l'accumulateur s'élève à 8,4 V, mais dépend de l'état de charge ainsi que du courant de charge I_{Accu} et peut atteindre dans la pratique jusqu'à 10 V. Elle détermine la tension dans toutes les branches montées en parallèle (Fig. 1) :

(1) $$U_{Accu} = U_{Op} = U_L = U_{Solar}$$

Le courant fourni I_{Solar} est utilisé comme courant de service I_{Op} pour le compteur de charges électronique, comme courant de charge I_{Accu} pour l'accumulateur et comme courant I_L par la charge connectée. Le bilan énergétique

(2) $$I_{Solar} = I_{Accu} + I_{Op} + I_L$$

s'applique également en cas de courants de charge négatifs I_{Accu}, donc en cas de décharge de l'accumulateur.

Le courant de service I_{Op} = 10 mA est déterminé par le circuit électronique du compteur de charges, tandis que le courant débité I_L dépend de la résistance ohmique R_L de la charge connectée. L'accumulateur est donc chargé lorsque l'installation photovoltaïque fournit du courant et que la résistance de charge n'est pas trop faible. Pour garantir une charge fiable de l'accumulateur même à faible éclairement lumineux, l'installation photovoltaïque est configurée de manière à ce que sa tension à vide U_{OC} soit nettement supérieure à la tension U_{Accu}. Une comparaison avec les caractéristiques mesurées dans l'expérience UE8020100 montre qu'on peut l'obtenir fiablement en montant deux modules en série. Le courant solaire fourni I_{Solar} est alors proportionnel dans une bonne approximation à l'éclairement lumineux E et atteint dans des conditions de laboratoire des valeurs jusqu'à 50 mA, idéales pour une charge rapide de l'accumulateur.
Comme charge ohmique, on utilise un moteur à courant continu et une cascade de résistances qui permettent de balayer la caractéristique courant de charge / courant débité de l'installation autonome et en outre de confirmer que le courant solaire fourni est indépendant de la charge ohmique. Dans le résultat, on peut indiquer par ex. la luminosité minimale requise pour charger l'accumulateur en l'absence de toutes les charges.

NOTE

Lorsque les modules photovoltaïques sont utilisés dans un rayonnement solaire à l'extérieur, les courants obtenus peuvent être bien supérieurs. Dans ce cas, il est recommandé de ne pas brancher l'accumulateur sans charge ohmique supplémentaire, celle-ci garantissant que le courant de charge I_{Accu} ne dépasse pas 44 mA.

EVALUATION

Le courant de service du compteur de charges est déterminé par la charge qui s'écoule en 30 s de l'accumulateur, aucun module ni consommateur n'étant connecté.

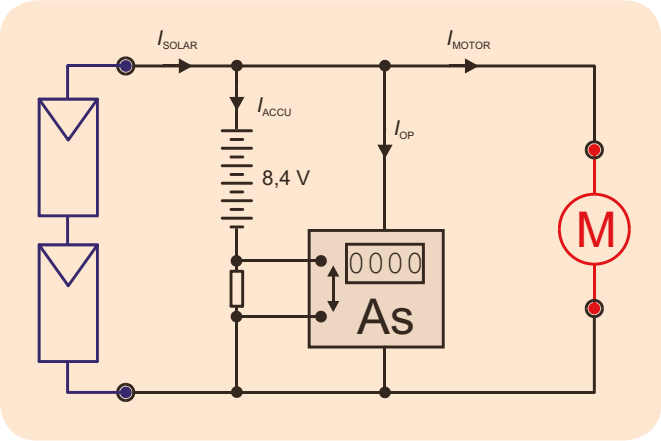


Fig. 1 : Schéma fonctionnel de l'installation autonome

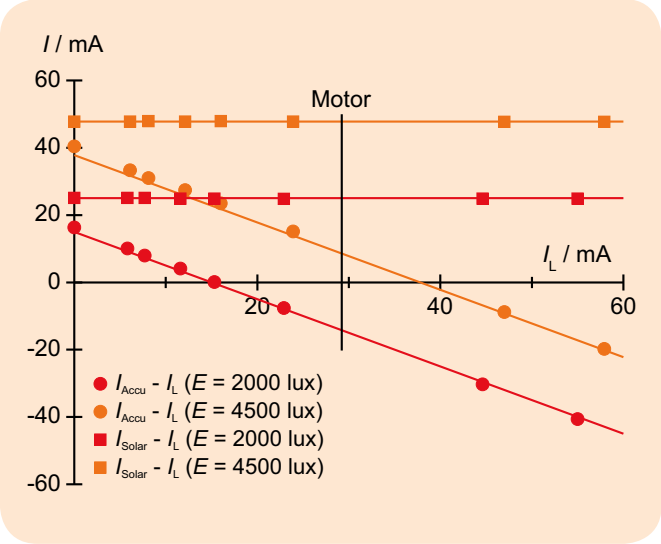


Fig. 2 : Caractéristiques de charge de l'installation autonome

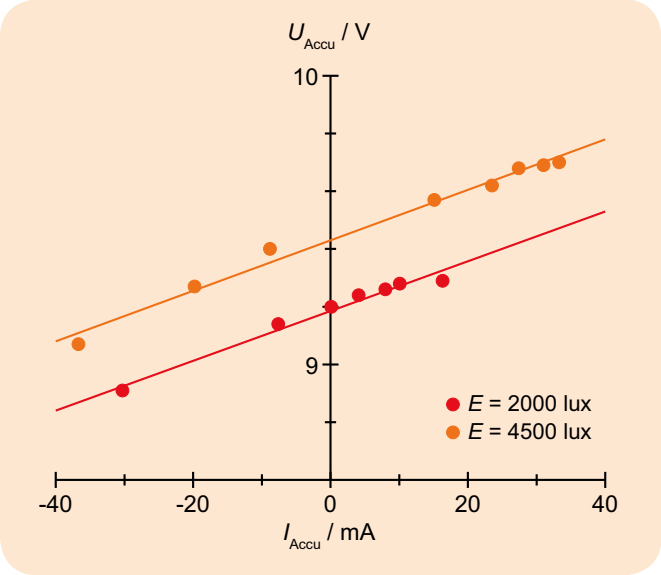


Fig. 3 : Caractéristiques de l'accumulateur, mesurées à différents éclairements lumineux. Selon l'état de charge de l'accumulateur, ces caractéristiques sont décalées par le haut ou par le bas sur l'axe y.

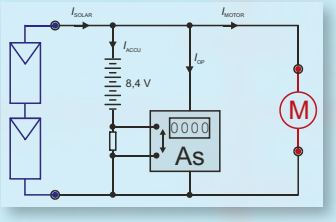


Schéma fonctionnel de l'installation autonome

Installations photovoltaïques (UE8020250) :
Étude d'une installation autonome permettant de produire et de stocker de l'énergie électrique

Les installations autonomes sont des équipements d'alimentation électrique qui ne sont pas connectés à un réseau électrique public et comprennent la production et le stockage d'énergie électrique. Souvent, on utilise des modules photovoltaïques pour produire de l'énergie et des accumulateurs pour en stocker. Pour reproduire une telle installation autonome, l'expérience utilise deux modules photovoltaïques pour charger un accumulateur à hydrure métallique de nickel. Un moteur à courant continu est connecté pour décharger l'accumulateur, tandis qu'un compteur de charges électronique mesure la charge arrivante ou partante. Le montage en série de deux modules permet d'obtenir une charge fiable de l'accumulateur même à faible éclairement lumineux, car la tension à vide se situe nettement au-dessous de la tension de l'accumulateur.

Page 42