

**EXPÉRIENCE DE PHYSIQUE**  
Rendez-nous visite [3bscientific.fr](http://3bscientific.fr)

Mécanique

Thermodynamique

Electricité

Optique

Physique atomique et nucléaire

Physique des solides

## CHER CLIENT

Aux pages suivantes, nous vous présentons plus de 100 expériences pour l'enseignement moderne de la physique. Ce savant assemblage couvre toute l'étendue des cours, de la physique classique à la physique moderne. Selon votre groupe cible et vos projets, vous pouvez choisir entre des expériences de base, avancées et exigeantes.

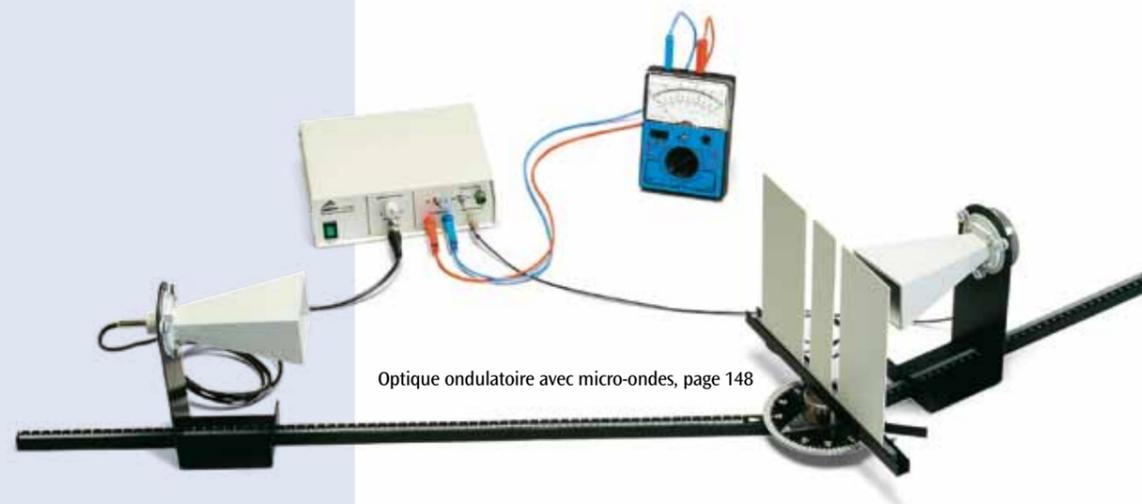
Pour chaque expérience, vous trouverez :

- un énoncé
- une illustration du montage expérimental
- une représentation des notions fondamentales théoriques et expérimentales
- une vue d'ensemble des résultats de mesure
- une liste détaillée des appareils

Vous trouverez également des informations détaillées sur les appareils sur notre site Internet [www.3bscientific.com](http://www.3bscientific.com). Nous vous conseillons volontiers par téléphone et courriel.

De même, nous élaborons volontiers d'autres assemblages pour proposer de nouveaux thèmes et répondre ainsi à vos demandes spécifiques.

Merci par avance pour toutes vos remarques, questions et commandes.



Optique ondulatoire avec micro-ondes, page 148

### 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 9001:2008 et de la Worlddidac Quality Charter, il est régulièrement confirmé par des experts indépendants.

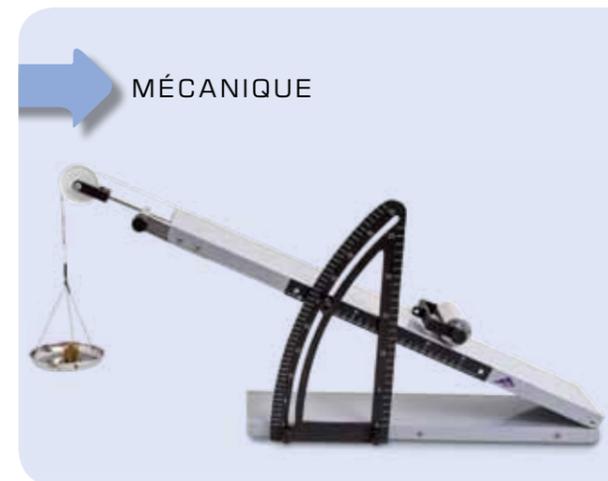
**Vous pouvez nous faire confiance**



## LÉGENDE

- 1** → expérience de base
- 2** → expérience avancée
- 3** → expérience exigeante

## SOMMAIRE



### PROCÉDÉS DE MESURE

Sphéromètre (UE1010100) : .....8  
Détermination de rayons de courbure sur des verres de montres

Longueur et volume (UE1010200) : ..... 10  
Mesure d'un objet de forme irrégulière

Constante de gravitation (UE1010300) : ..... 12  
Mesurer la force de gravité et déterminer la constante de gravitation avec la balance de torsion de Cavendish.

### FORCES

Leviers simple et double (UE1020200) : ..... 14  
Confirmer le principe des leviers

Parallélogramme des forces (UE1020300) : ..... 16  
Analyse expérimentale de l'addition vectorielle de forces

Plan incliné (UE1020400) : ..... 18  
Déterminer la force résultante

Friction par adhérence et de glissement (UE1020500) : ..... 20  
Mesure des forces de friction

### POUSSÉE D'ARCHIMÈDE

Poussée d'Archimède (UE1020850) : ..... 22  
Déterminer la force de poussée en fonction de la profondeur d'immersion

### MOUVEMENTS DE TRANSLATION

Mouvements rectilignes uniformément accélérés (UE1030250) : ..... 24  
Mesure de la vitesse instantanée en fonction de la trajectoire parcourue

Mouvements rectilignes uniformément accélérés (UE1030260) : ..... 26  
Enregistrement et analyse de mouvements uniformément accélérés sur un rail à faible frottement

Chute libre (UE1030300) : ..... 28  
Détermination de l'accélération de la pesanteur

Jet oblique (UE1030400) : ..... 30  
Saisie point par point des « paraboles de jet »

Chocs bidimensionnels (UE1030600) : ..... 32  
Étudier les chocs élastiques et inélastiques de deux corps sur un plan

Deuxième loi de Kepler (UE1030700) : ..... 34  
Validation de la loi des aires pour les mouvements à force centrale

### MOUVEMENTS DE ROTATION

Mouvements de rotation à accélération uniforme (UE1040101) : ..... 36  
Confirmation de l'équation du mouvement de Newton

Moment d'inertie (UE1040201) : ..... 38  
Confirmation du moment d'inertie d'une barre avec des masses supplémentaires.

Moment d'inertie (UE1040205) : ..... 40  
Déterminer le moment d'inertie de différents corps

Mouvements gyroscopiques (UE1040500) : ..... 42  
Précession et nutation d'un gyroscope

### OSCILLATIONS ET ONDES

Mouvement oscillatoire harmonique d'un pendule pesant simple (UE1050101) : ..... 44  
Mesure de la période d'oscillation d'un pendule simple pour différentes masses suspendues

Mouvement oscillatoire elliptique d'un pendule pesant simple (UE1050121) : ..... 46  
Description du mouvement oscillatoire elliptique d'un pendule pesant simple comme recouvrement de deux composants perpendiculaires l'un à l'autre

Pendule gravitationnel variable (UE1050201) : ..... 48  
Mesure de la période d'oscillation d'un pendule en fonction de la composante efficace de l'accélération de la pesanteur.

Pendule de Foucault (UE1050250) : ..... 50  
Démontrer la rotation de la Terre avec un pendule de Foucault

Oscillations harmoniques (UE1050311) : ..... 52  
„Mesure des oscillations d'un pendule élastique vertical au moyen d'un détecteur de mouvement à ultrasons“

Pendule tournant d'après Pohl (UE1050500) : ..... 54  
Mesurer et analyser des oscillations tournantes harmoniques libres

Pendule tournant d'après Pohl (UE1050550) : ..... 56  
Mesurer et analyser des oscillations forcées

## SOMMAIRE



### PROCÉDÉS DE MESURE

Sphéromètre (UE1010100) : .....8  
Détermination de rayons de courbure sur des verres de montres

Longueur et volume (UE1010200) : .....10  
Mesure d'un objet de forme irrégulière

Constante de gravitation (UE1010300) : .....12  
Mesurer la force de gravité et déterminer la constante de gravitation avec la balance de torsion de Cavendish.

### FORCES

Leviers simple et double (UE1020200) : .....14  
Confirmer le principe des leviers

Parallélogramme des forces (UE1020300) : .....16  
Analyse expérimentale de l'addition vectorielle de forces

Plan incliné (UE1020400) : .....18  
Déterminer la force résultante

Friction par adhérence et de glissement (UE1020500) : .....20  
Mesure des forces de friction

### POUSSÉE D'ARCHIMÈDE

Poussée d'Archimède (UE1020850) : .....22  
Déterminer la force de poussée en fonction de la profondeur d'immersion

### MOUVEMENTS DE TRANSLATION

Mouvements rectilignes uniformément accélérés (UE1030250) : .....24  
Mesure de la vitesse instantanée en fonction de la trajectoire parcourue

Mouvements rectilignes uniformément accélérés (UE1030260) : .....26  
Enregistrement et analyse de mouvements uniformément accélérés sur un rail à faible frottement

Chute libre (UE1030300) : .....28  
Détermination de l'accélération de la pesanteur

Jet oblique (UE1030400) : .....30  
Saisie point par point des « paraboles de jet »

Chocs bidimensionnels (UE1030600) : .....32  
Étudier les chocs élastiques et inélastiques de deux corps sur un plan

Deuxième loi de Kepler (UE1030700) : .....34  
Validation de la loi des aires pour les mouvements à force centrale

### MOUVEMENTS DE ROTATION

Mouvements de rotation à accélération uniforme (UE1040101) : .....36  
Confirmation de l'équation du mouvement de Newton

Moment d'inertie (UE1040201) : .....38  
Confirmation du moment d'inertie d'une barre avec des masses supplémentaires.

Moment d'inertie (UE1040205) : .....40  
Déterminer le moment d'inertie de différents corps

Mouvements gyroscopiques (UE1040500) : .....42  
Précession et nutation d'un gyroscope

### OSCILLATIONS ET ONDES

Mouvement oscillatoire harmonique d'un pendule pesant simple (UE1050101) : .....44  
Mesure de la période d'oscillation d'un pendule simple pour différentes masses suspendues

Mouvement oscillatoire elliptique d'un pendule pesant simple (UE1050121) : .....46  
Description du mouvement oscillatoire elliptique d'un pendule pesant simple comme recouvrement de deux composants perpendiculaires l'un à l'autre

Pendule gravitationnel variable (UE1050201) : .....48  
Mesure de la période d'oscillation d'un pendule en fonction de la composante efficace de l'accélération de la pesanteur.

Pendule de Foucault (UE1050250) : .....50  
Démontrer la rotation de la Terre avec un pendule de Foucault

Oscillations harmoniques (UE1050311) : .....52  
„Mesure des oscillations d'un pendule élastique vertical au moyen d'un détecteur de mouvement à ultrasons“

Pendule tournant d'après Pohl (UE1050500) : .....54  
Mesurer et analyser des oscillations tournantes harmoniques libres

Pendule tournant d'après Pohl (UE1050550) : .....56  
Mesurer et analyser des oscillations forcées

## SOMMAIRE

|   |    |
|---|----|
| Oscillations couplées (UE1050600) : .....   | 58 |
| Enregistrement et évaluation des oscillations de deux pendules identiques couplés   |    |
| Ondes mécaniques (UE1050700) : .....  | 60 |
| Étudier des ondes stationnaires sur un ressort hélicoïdal tendu et une corde tendue |    |

### ACOUSTIQUE

|  |    |
|--|----|
| Vitesse du son dans l'air (UE1070310) : .....                  | 62 |
| Mesure des durées des impulsions sonores dans un tube de Kundt |    |

|  |    |
|--|----|
| Vitesse du son dans l'air (UE1070320) : .....                            | 64 |
| Générer et mesurer les ondes stationnaires sonores dans un tube de Kundt |    |

|   |    |
|---|----|
| Vitesse du son dans des corps solides (UE1070530) : .....   | 66 |
| Détermination des vitesses du son pour des ondes longitudinales et transversales dans des corps solides |    |

|  |    |
|--|----|
| Effet de Lucas-Biquard (UE1070550) : .....                         | 68 |
| Détermination de la vitesse d'ondes ultrasonores dans les liquides |    |

### MÉCANIQUE DES LIQUIDES ET DES GAZ

|   |    |
|---|----|
| Viscosimètre à chute de bille (UE1080350) : .....                     | 70 |
| Déterminer la viscosité dynamique d'une solution aqueuse de glycérine |    |

|   |    |
|---|----|
| Tension superficielle (UE1080400) : .....                       | 72 |
| Mesure de la tension superficielle selon la méthode d'adhérence |    |



### DILATATION THERMIQUE

|   |    |
|---|----|
| Dilatation thermique de corps solides (UE2010130) : .....                   | 74 |
| Déterminer les coefficients de dilatation du laiton, de l'acier et du verre |    |

|  |    |
|--|----|
| Anomalie de l'eau (UE2010301) : .....                          | 76 |
| Détermination de la température de la densité maximum de l'eau |    |

### TRANSFERT DE CHALEUR

|   |    |
|---|----|
| Conduction thermique (UE2020100) : .....                    | 78 |
| Mesurer la conduction thermique dans des barres métalliques |    |

|   |    |
|---|----|
| Cube de Leslie (UE2020200) : .....                  | 80 |
| Mesure du rayonnement thermique d'un cube de Leslie |    |

### ENERGIE INTERNE

|  |    |
|--|----|
| Énergie interne et travail mécanique (UE2030300) : .....   | 82 |
| Augmentation de l'énergie interne par le travail mécanique |    |

|   |    |
|---|----|
| Énergie interne et travail électrique (UE2030400) : .....   | 84 |
| Augmentation de l'énergie interne par le travail électrique |    |

### LOIS DES GAZ

|   |    |
|---|----|
| Loi de Boyle-Mariotte (UE2040100) : ..... | 86 |
| Mesure de l'air à température ambiante    |    |

|   |    |
|---|----|
| Le coefficient adiabatique de l'air (UE2040200) : .....                                   | 88 |
| Déterminer le coefficient adiabatique de l'air $C_p/C_v$ d'après l'expérience de Rüchardt |    |

|  |    |
|--|----|
| Gaz réel et point critique (UE2040300) : .....                         | 90 |
| Analyse quantitative d'un gaz réel et représentation du point critique |    |

## SOMMAIRE

### CYCLES

|  |    |
|--|----|
| Moteur Stirling D (UE2060100) : .....  | 92 |
| Fonctionnement du modèle d'un moteur à air chaud servant de moteur thermique |    |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| Moteur Stirling G (UE2060250) : ..... | 94 |
| Enregistrement du diagramme $p-V$     |    |

|   |    |
|---|----|
| Pompe à chaleur (UE2060300) : .....   | 96 |
| Enregistrement et analyse du diagramme Pression-Enthalpie d'une pompe à chaleur à compression |    |



### ELECTROSTATIQUE

|  |    |
|--|----|
| Champ électrique dans un condensateur à plaques (UE3010700) : .....                                | 98 |
| Mesure du champ électrique dans un condensateur à plaques à l'aide du mesureur du champ électrique |    |

|  |     |
|--|-----|
| Tension sur un condensateur à plaques (UE3010800) : .....                              | 100 |
| Mesure statique de la tension en fonction de l'écart entre les plaques du condensateur |     |

### TRANSPORT DE CHARGE ET COURANT

|  |     |
|--|-----|
| Gouttes d'eau chargées (UE3020100) : .....   | 102 |
| Démontrer le courant électrique généré par le déplacement de gouttes d'eau chargées. |     |

|   |     |
|---|-----|
| Conductivité électrique (UE3020200) : .....                       | 104 |
| Déterminer la conductivité électrique du cuivre et de l'aluminium |     |

|  |     |
|--|-----|
| Pont de mesure de Wheatstone (UE3020300) : ..... | 106 |
| Détermination des résistances ohmiques           |     |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| Loi d'Ohm (UE3020320) : ..... | 108 |
| Confirmation de la loi d'Ohm  |     |

|  |     |
|--|-----|
| Lois de Kirchhoff (UE3020330) : .....  | 110 |
| Mesures de tension et de courant sur des circuits de résistances montés en série et en parallèle |     |

|   |     |
|---|-----|
| Pont diviseur de tension (UE3020340) : .....  | 112 |
| Mesures de tension et de courant d'un pont diviseur de tension chargé et non chargé |     |

|  |     |
|--|-----|
| Électrolyse (UE3020700) : .....          | 114 |
| Détermination de la constante de Faraday |     |

### CHAMP MAGNÉTIQUE

|   |     |
|---|-----|
| Force de Lorentz (UE3030300) : .....  | 116 |
| Mesure de la force exercée sur un conducteur électriquement chargé dans un champ magnétique |     |

|   |     |
|---|-----|
| Champ magnétique d'une bobine cylindrique (UE3030500) : .....                   | 118 |
| Déterminer le champ magnétique de bobines cylindriques de différentes longueurs |     |

|   |     |
|---|-----|
| Champ magnétique terrestre (UE3030700) : .....                                    | 120 |
| Déterminer les composantes horizontale et verticale du champ magnétique terrestre |     |

### INDUCTION

|   |     |
|---|-----|
| Loi de Faraday sur l'induction (UE3040100) : .....  | 122 |
| Production d'un pic de surtension dans une boucle conductrice à l'aide d'un aimant permanent en mouvement |     |

|  |     |
|--|-----|
| Induction dans une boucle conductrice en mouvement (UE3040200) : .....                   | 124 |
| Mesure de la tension d'induction dans une boucle conductrice mue par un champ magnétique |     |

|  |     |
|--|-----|
| Pendule de Waltenhofen (UE3040400) : .....                                   | 126 |
| Démonstration et analyse du fonctionnement d'un frein à courants de Foucault |     |

|   |     |
|---|-----|
| Transformateur (UE3040500) : .....                              | 128 |
| Effectuer des mesures sur un transformateur à vide et en charge |     |

### CIRCUITS À COURANT CONTINU ET À COURANT ALTERNATIF

|  |     |
|--|-----|
| Charge et décharge d'un condensateur (UE3050101) : .....   | 130 |
| Étude de l'évolution de la tension aux bornes d'un condensateur lorsque celui-ci est traversé par un courant de charge et de décharge. |     |

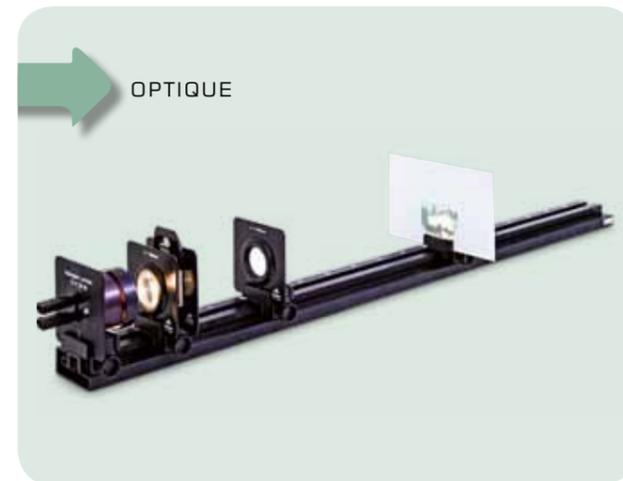
|  |     |
|--|-----|
| Charge et décharge d'un condensateur (UE3050105) : ..... | 132 |
| Mesure des temps de charge et de décharge                |     |

|   |     |
|---|-----|
| Résistance d'un condensateur dans un circuit à courant alternatif (UE3050111) : ..... | 134 |
| Déterminer la réactance capacitive en fonction de la capacité et de la fréquence      |     |

|   |     |
|---|-----|
| Charge et décharge d'une bobine (UE3050201) : .....   | 136 |
| Étude de l'évolution du courant d'une bobine alimentée tension continue à l'allumage et à l'extinction du circuit |     |

|  |     |
|--|-----|
| Résistance d'une bobine dans un circuit à courant alternatif (UE3050211) : .....   | 138 |
| Déterminer la réactance inductive d'une bobine en fonction de l'inductance et de la fréquence  |     |
| Résistances dans les circuits à courant alternatif (UE3050301) : .....   | 140 |
| Déterminer la valeur de la résistance (impédance) dans un circuit comportant des charges capacitatives et résistives                 |     |
| Résistances dans les circuits à courant alternatif (UE3050311) : .....   | 142 |
| Déterminer la valeur de l'impédance d'un circuit comportant des charges inductives et résistives                                     |     |
| Résistances dans les circuits à courant alternatif (UE3050311) : .....   | 144 |
| Détermination de l'impédance d'un circuit électrique à résistance inductive et capacitive  |     |
| Circuit oscillant LC (UE3050400) : .....   | 146 |
| Étudier le comportement de résonance d'un circuit oscillant série LC   |     |
| <b>OSCILLATIONS ET ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES</b>  |     |
| Optique ondulatoire avec micro-ondes (UE3060300) : .....   | 148 |
| Démonstration et étude de l'interférence, la diffraction et la polarisation sur des micro-ondes                                      |     |
| <b>TUBES ÉLECTRONIQUES</b>   |     |
| Tube à diode (UE3070100) : .....   | 150 |
| Enregistrement de la caractéristique d'une diode   |     |
| Tube à triode (UE3070200) : .....  | 152 |
| Enregistrement du réseau de caractéristiques d'une triode.   |     |
| Tube à croix de Malte (UE3070300) : .....  | 154 |
| Démonstration de la propagation linéaire d'électrons dans un espace exempt de champ  |     |
| Tube de Perrin (UE3070400) : .....   | 156 |
| Détermination de la polarité des porteurs de charge  |     |
| Tube de Thomson (UE3070500) : .....  | 158 |
| Etude de la déviation d'électrons dans un champ électrique et magnétique   |     |
| Tube à pinceau étroit (UE3070700) : .....  | 160 |
| Détermination de la charge spécifique de l'électron  |     |
| Oscilloscope didactique (UE3070800) : .....  | 162 |
| Etude des principes physiques fondamentaux pour la représentation oscilloscopique à résolution dans le temps des signaux électriques |     |
| Oscilloscope didactique II (UE3070850) : .....   | 164 |
| Démonstration de la superposition non parasitée de champs magnétiques sous vide  |     |

|   |     |
|---|-----|
| <b>ÉLECTRONIQUE</b>   |     |
| Transistor bipolaire (UE3080200) : .....                        | 166 |
| Mesurer les caractéristiques significatives d'un transistor NPN |     |
| Transistor à effet de champ (UE3080300) : .....                 | 168 |
| Mesurer les caractéristiques d'un transistor à effet de champ   |     |



|  |     |
|--|-----|
| <b>OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE</b>   |     |
| Relation de conjugaison (UE4010100) : .....                          | 170 |
| Détermination de la focale d'une lentille selon la méthode de Bessel |     |

|   |     |
|---|-----|
| <b>COULEURS</b>   |     |
| Spectres de transmission (UE4020400) : .....                                    | 172 |
| Enregistrement et évaluation des spectres de transmission de corps transparents |     |

|  |     |
|--|-----|
| <b>OPTIQUE ONDULATOIRE</b>   |     |
| Diffraction par fentes multiples et réseaux (UE4030200) : .....                        | 174 |
| Démonstration de la nature des ondes lumineuses et détermination de la longueur d'onde |     |

|  |     |
|--|-----|
| Biprisme de Fresnel (UE4030300) : .....                                | 176 |
| Générer une interférence entre deux rayons avec un biprisme de Fresnel |     |

|   |     |
|---|-----|
| Anneaux de Newton (UE4030350) : .....                       | 178 |
| Observer les anneaux de Newton à la lumière monochromatique |     |

|   |     |
|---|-----|
| Interféromètre de Michelson (UE4030410) : .....                             | 180 |
| Démonstration et analyse du fonctionnement d'un interféromètre de Michelson |     |

|   |     |
|---|-----|
| Interféromètre de Mach-Zehnder (UE4030520) : .....                            | 182 |
| Démonstration de la gomme quantique dans le cadre d'une expérience analogique |     |

|   |     |
|---|-----|
| <b>POLARISATION</b>   |     |
| Loi de Malus (UE4040100) : .....                                  | 184 |
| Confirmer la loi de Malus pour la lumière à polarisation linéaire |     |

|  |     |
|--|-----|
| Activité optique (UE4040300) : .....   | 186 |
| Rotation du plan de polarisation par des solutions de sucre                        |     |
| Effet Faraday (UE4040600) : .....  | 188 |
| Démontrer l'effet Faraday et déterminer la constante de Verdet pour le verre flint |     |

|   |     |
|---|-----|
| <b>INTENSITÉ DE RAYONNEMENT</b>   |     |
| Loi du carré de la distance (UE4050100) : .....   | 190 |
| Confirmer la loi du carré de la distance pour l'intensité de rayonnement d'une source lumineuse |     |

|  |     |
|--|-----|
| Loi de Stefan-Boltzmann (UE4050200) : .....                              | 192 |
| Confirmer la dépendance de l'intensité de rayonnement vis-à-vis de $T^4$ |     |

|  |     |
|--|-----|
| <b>VITESSE DE LA LUMIÈRE</b>   |     |
| Détermination de la vitesse de la lumière (UE4060100) : .....  | 194 |
| Détermination de la vitesse de la lumière à partir de la durée de parcours d'impulsions lumineuses courtes |     |

|  |     |
|--|-----|
| <b>PHYSIQUE DES LASERS</b>                     |     |
| Laser Nd:YAG (UE4070310) : .....               | 196 |
| Installation et optimisation d'un laser Nd:YAG |     |

|   |     |
|---|-----|
| Laser Nd:YAG (UE4070320) : .....  | 198 |
| Fonctionnement en mode déclenché (Q-switch) d'un laser Nd:YAG au moyen d'un cristal de Cr-YAG |     |

|  |     |
|--|-----|
| Laser Nd:YAG (UE4070330) : .....   | 200 |
| Doublement de fréquence dans la cavité de résonance interne dans un laser Nd:YAG |     |



|   |     |
|---|-----|
| <b>EXPÉRIENCE D'INTRODUCTION À LA PHYSIQUE ATOMIQUE</b>   |     |
| Constante de Planck (UE5010200) : .....   | 202 |
| Détermination de la constante de Planck selon la méthode de la contre-tension                   |     |
| Microscope à effet tunnel (STM) (UE5010300) : .....   | 204 |
| Caractérisation physique de la structure atomique d'une surface en graphite et d'une surface en |     |

|  |     |
|--|-----|
| Diffraction d'électrons (UE5010500) : .....  | 206 |
| Observation de la diffraction d'électrons sur graphite polycristallin et confirmation de la nature ondulatoire des électrons |     |

|   |     |
|---|-----|
| <b>COUCHE ÉLECTRONIQUE</b>  |     |
| Spectres de raies (UE5020100) : .....   | 208 |
| Enregistrement et évaluation de la série de Balmer de l'hydrogène et d'autres spectres de raies dans le domaine visible |     |

|   |     |
|---|-----|
| Spectres de raies (UE5020150) : .....                         | 210 |
| Mesure à haute résolution de raies d'absorption et d'émission |     |

|   |     |
|---|-----|
| Expérience de Franck et Hertz sur le mercure (UE5020300) : .....            | 212 |
| Enregistrement et évaluation de la courbe de Franck et Hertz sur le mercure |     |

|  |     |
|--|-----|
| Expérience de Franck et Hertz sur le néon (UE5020400) : .....  | 214 |
| Enregistrement et évaluation de la courbe de Franck et Hertz sur le néon et observation de l'émission de lumière |     |

|  |     |
|--|-----|
| Potentiels critiques (UE5020500) : .....                   | 216 |
| Détermination des potentiels critiques de l'atome d'hélium |     |

|  |     |
|--|-----|
| <b>RÉSONANCE MAGNÉTIQUE</b>  |     |
| Résonance paramagnétique électronique (UE5030100) : .....                | 218 |
| Mise en évidence de la résonance paramagnétique électronique sur du DPPH |     |

|   |     |
|---|-----|
| Résonance magnétique nucléaire (UE5030200) : .....  | 220 |
| Mise en évidence et comparaison de la résonance magnétique nucléaire de la glycérine, du polystyrène et du téflon |     |

|  |     |
|--|-----|
| <b>PHYSIQUE DES SOLIDES / PHÉNOMÈNES DE CONDUCTION</b>                 |     |
| La conduction électrique dans les semi-conducteurs (UE6020100) : ..... | 222 |
| Calcul de l'énergie de gap (intervalle de bande) du germanium          |     |

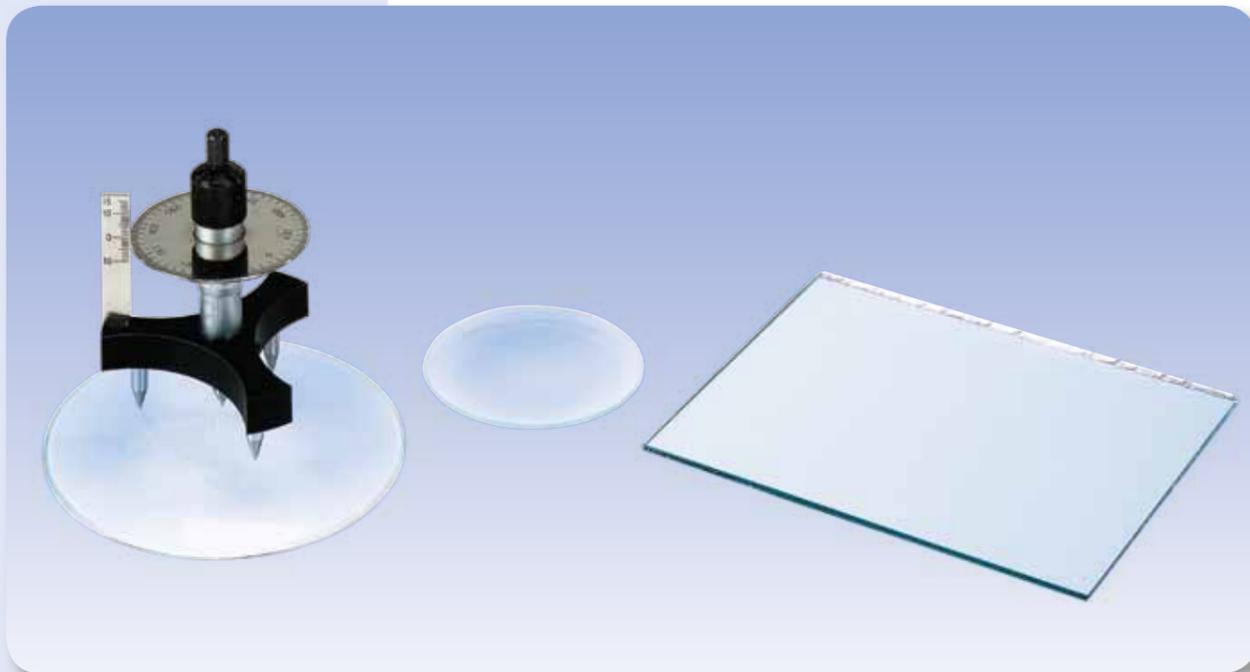
|   |     |
|---|-----|
| Effet Hall dans les semi-conducteurs (UE6020200) : .....                                | 224 |
| Étude des mécanismes de la conduction électrique dans le germanium dopé avec effet Hall |     |

|   |     |
|---|-----|
| Effet Seebeck (UE6020500) : .....   | 226 |
| Enregistrer les caractéristiques de différents thermocouples et déterminer la sensibilité |     |

|   |     |
|---|-----|
| <b>PHYSIQUE DES RAYONS X / DIFFRACTOMÉTRIE</b>                    |     |
| Réflexion de Bragg (UE7010100) : .....                            | 228 |
| Déterminer les constantes de réseau des cristaux à structure NaCl |     |

|  |     |
|--|-----|
| <b>PHYSIQUE DES RAYONS X / SPECTROSCOPIE D'ÉNERGIE</b> |     |
| Fluorescence X (UE7020100) : .....                     | 230 |
| Analyse non destructive de la composition chimique     |     |

|  |     |
|--|-----|
| <b>AUTRES ACTIVITÉS</b>                |     |
| Travaux Pratiques Elèves (SEE) : ..... | 232 |
| Biologie : .....                       | 236 |
| Géologie : .....                       | 240 |



EXERCICES

- Mesure des hauteurs de bombement  $h$  de deux verres de montres dans un écart défini  $s$  entre les pointes des pieds du sphéromètre.
- Calcul des rayons de courbure  $R$  des deux verres de montres.
- Comparaison des méthodes pour les courbures convexes et concaves.

OBJECTIF

Détermination des rayons de courbure sur des verres de montres

RESUME

La hauteur de bombement  $h$  de la surface d'une bille au-dessus ou au-dessous d'un plan défini par les points angulaires d'un triangle équilatéral permet de déterminer le rayon de courbure  $R$  de la surface de la sphère bille. Il est possible de le déterminer sur des courbures convexes et concaves.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                                    | Référence |
|--------|---|-----------|
| 1      | Sphéromètre de précision                    | 1002947   |
| 1      | Miroir plan                                 | 1003190   |
| 1      | Jeu de 10 coupes en verre de montre, 80 mm  | 1002868   |
| 1      | Jeu de 10 coupes en verre de montre, 125 mm | 1002869   |



GENERALITES

Le sphéromètre est constitué d'un trépied avec trois points en acier qui forment un triangle équilatéral de 50 mm de côté. Une vis micro-métrique avec pointe de mesure passe par le centre du trépied. Une règle graduée verticale indique la hauteur  $h$  de la pointe de mesure au-dessus ou au-dessous du plan défini par les pointes des pieds. Le déplacement de la pointe de mesure peut être lu à  $1 \mu\text{m}$  près à l'aide d'une graduation sur un disque circulaire qui tourne avec la vis micro-métrique.

L'équation suivante décrit le rapport entre l'écart  $r$  des pointes des pieds avec le centre du sphéromètre, le rayon de courbure recherché  $R$  et la hauteur de bombement  $h$  :

$$(1) \quad R^2 = r^2 + (R-h)^2$$

Après la conversion, on obtient pour  $R$  :

$$(2) \quad R = \frac{r^2 + h^2}{2 \cdot h}$$

L'écart  $r$  résulte de la longueur  $u$  côté  $s$  du triangle équilatéral formé par les pointes des pieds :

$$(3) \quad r = \frac{s}{\sqrt{3}}$$

Pour  $R$ , l'équation est donc la suivante :

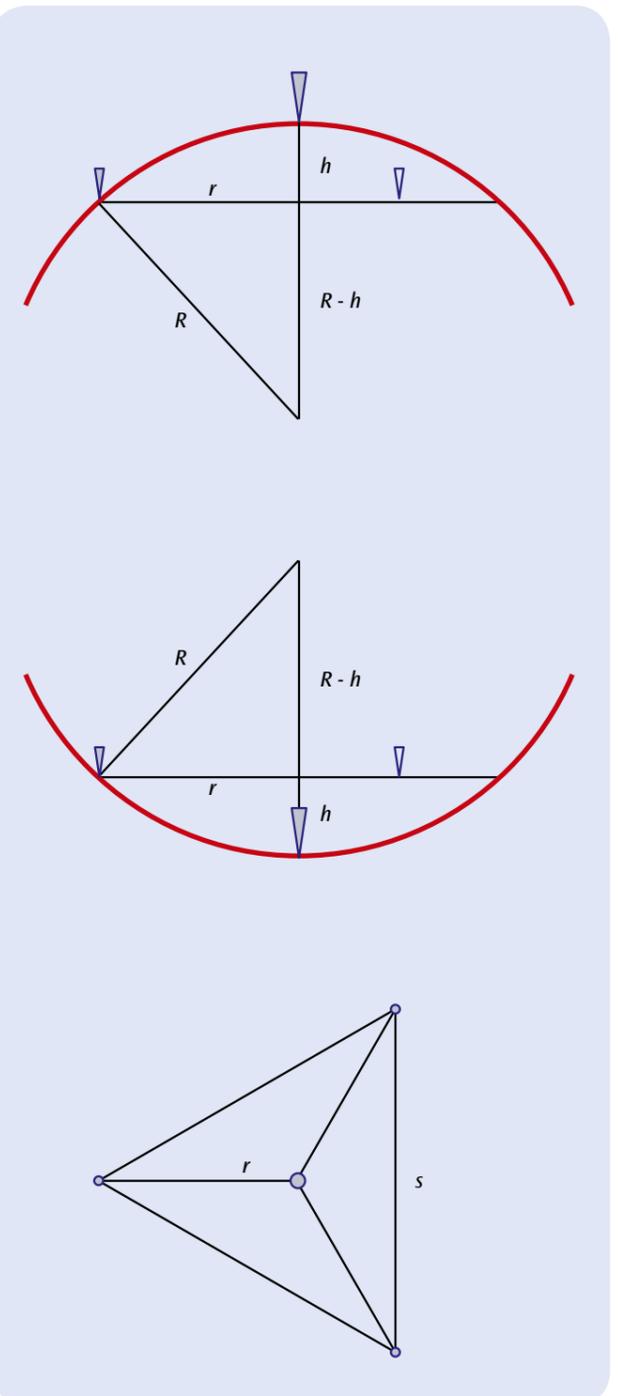
$$(4) \quad R = \frac{s^2}{6 \cdot h} + \frac{h}{2}$$

EVALUATION

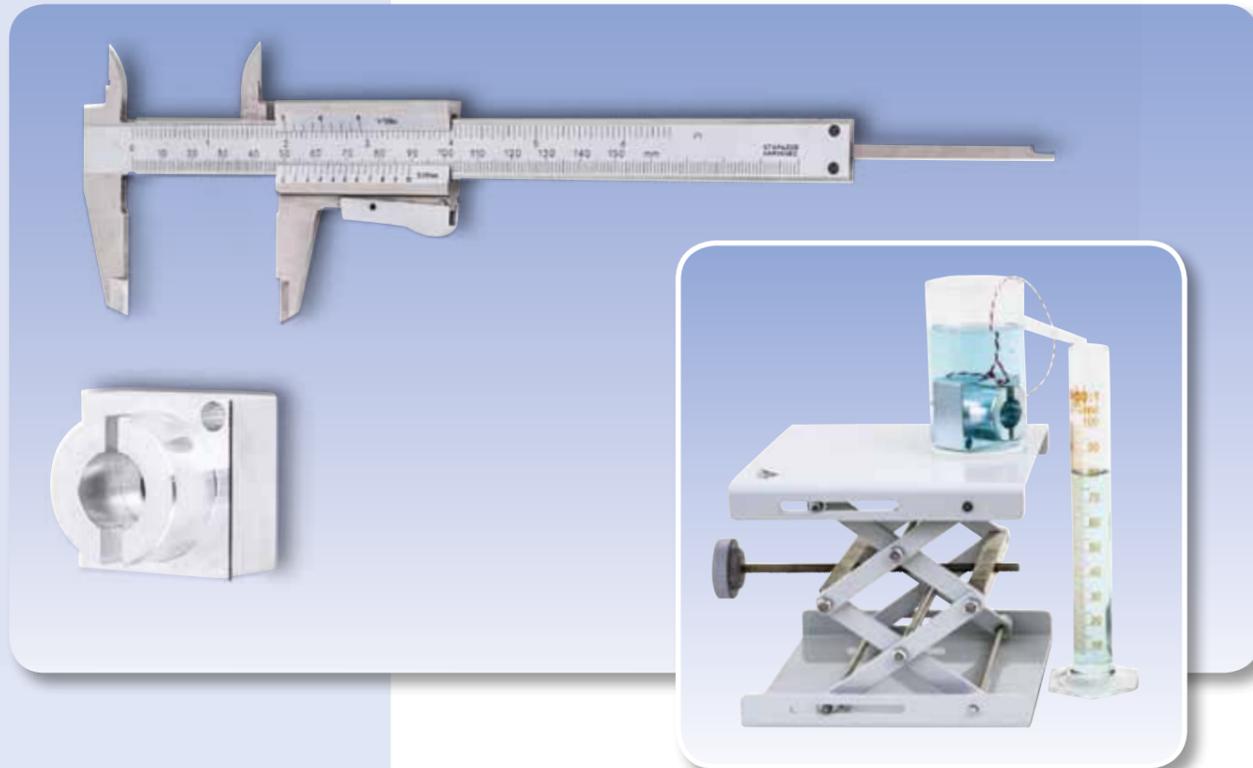
L'écart des pointes des pieds  $s$  du sphéromètre s'élève à 50 mm. Pour de faibles bombements  $h$ , l'équation (4) peut être simplifiée :

$$R = \frac{s^2}{6 \cdot h} = \frac{2500\text{mm}^2}{6 \cdot h} \approx \frac{420\text{mm}^2}{h}$$

La graduation du sphéromètre permet de lire des hauteurs de bombements entre 10 mm et  $1 \mu\text{m}$  à  $1 \mu\text{m}$  près. Il est possible ainsi de déterminer des rayons de courbure d'environ 40 mm à 400 m.



Représentation schématique pour la mesure du rayon de courbure avec un sphéromètre  
 En haut : Coupe verticale pour un objet de mesure à surface convexe  
 Milieu : Coupe verticale pour un objet de mesure à surface concave  
 En bas : Vue du haut



## EXERCICES

- Mesure des dimensions extérieures d'un objet de forme irrégulière.
- Mesure des dimensions intérieures d'un objet de forme irrégulière.
- Mesure de la profondeur d'un objet de forme irrégulière.
- Calcul et mesure du volume.

## OBJECTIF

Mesure d'un objet de forme irrégulière

## RESUME

Les pieds à coulisse sont utilisés pour mesurer avec précision des objets de faibles dimensions. Ils permettent le relevé des dimensions extérieures, intérieures et de la profondeur, comme décrit ci-après avec l'exemple d'un objet de forme irrégulière. Le calcul du volume sur la base des données acquises est relativement compliqué. La méthode par le trop-plein permet de le déterminer plus simplement.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre                      | Appareil                               | Référence |
|-----------------------------|--|-----------|
| 1                           | Pied à coulisse, 150 mm                | 1002601   |
| 1                           | Objet pour exercices de mesure         | 1006889   |
| <b>En plus recommandé :</b> |  |           |
| 1                           | Vase de trop-plein, transparent        | 1003518   |
| 1                           | Cylindre de mesure, 100 ml             | 1002870   |
| 1                           | Laborboy II                            | 1002941   |
| 1                           | Cordon expérimental                    | 1001055   |
| 1                           | Bécher forme haute, 600 mL (lot de 10) | 1002873   |

# 1

## GENERALITES

Les pieds à coulisse sont utilisés pour mesurer les objets de relativement faibles dimensions. Ils comportent généralement deux grands becs pour la prise des dimensions extérieures, deux becs pour les dimensions intérieures et une jauge de profondeur graduée pour mesurer la profondeur des perçages et des évidements.

Afin d'éviter les erreurs de mesure systématiques, le pied à coulisse doit être posé bien à plat sur l'objet à mesurer. La précision de mesure est augmentée par le vernier, qui permet de mesurer les dimensions à une échelle de 1/10e 1/20e ou 1/50e de millimètre. La lecture des millimètres (à l'échelle 1) s'effectue à gauche du zéro du vernier. La lecture des chiffres après la virgule se fait en repérant la graduation du vernier qui est mieux alignée à une graduation quelconque de la règle graduée en millimètres. En présence d'un récipient de trop-plein, le volume peut être déterminé selon la méthode par le trop-plein. L'objet est plongé dans le récipient de trop-plein rempli d'eau. L'eau déplacée s'écoule dans une éprouvette. Le volume d'eau déplacé (= le trop-plein) correspond au volume V de l'objet.

## EVALUATION

En général, on procède à plusieurs relevés d'une même mesure puis on calcule leur moyenne.

Pour calculer le volume, on décompose celui-ci en volumes partiels d'objets réguliers, qui sont additionnés ou, par ex. en cas de perçages, soustraits.

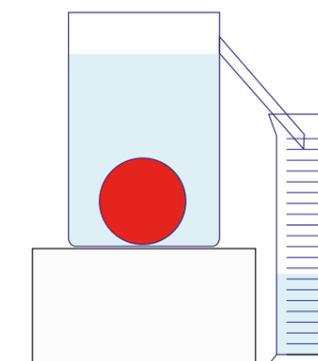
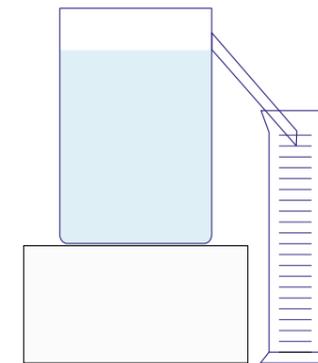


Fig. 6 Représentation schématique de la méthode par le trop-plein

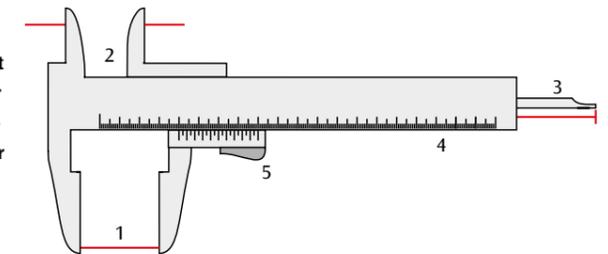


Fig. 1 Becs pour le relevé des dimensions extérieures (1), becs pour prise intérieure (2), jauge de profondeur (3), règle graduée en millimètres (4), coulisse avec vernier (5)

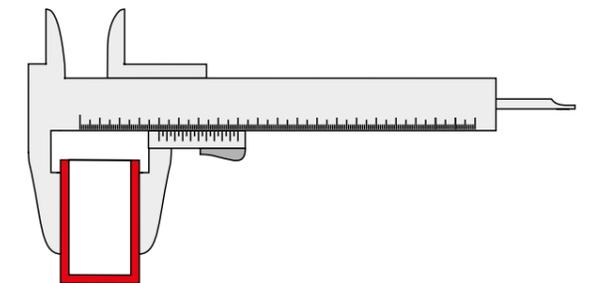


Fig. 2 Mesure d'une dimension extérieure

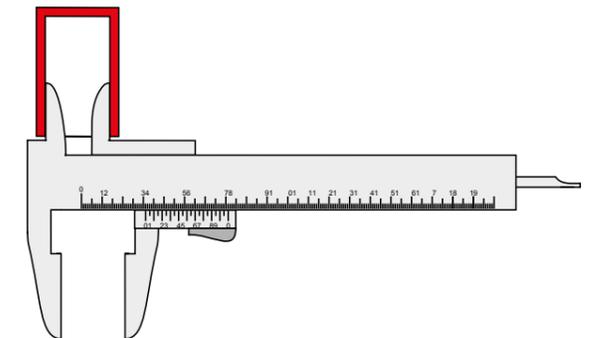


Fig. 3 Mesure d'une dimension intérieure

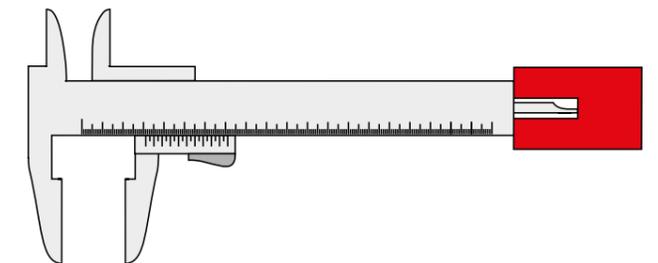


Fig. 4 Mesure de profondeur

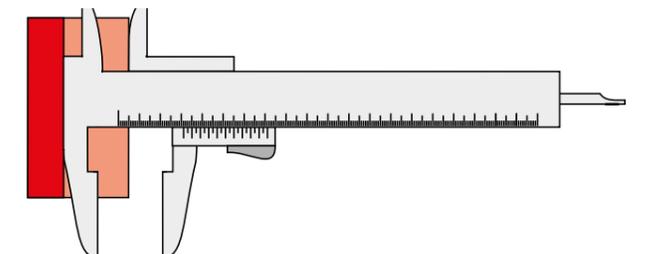
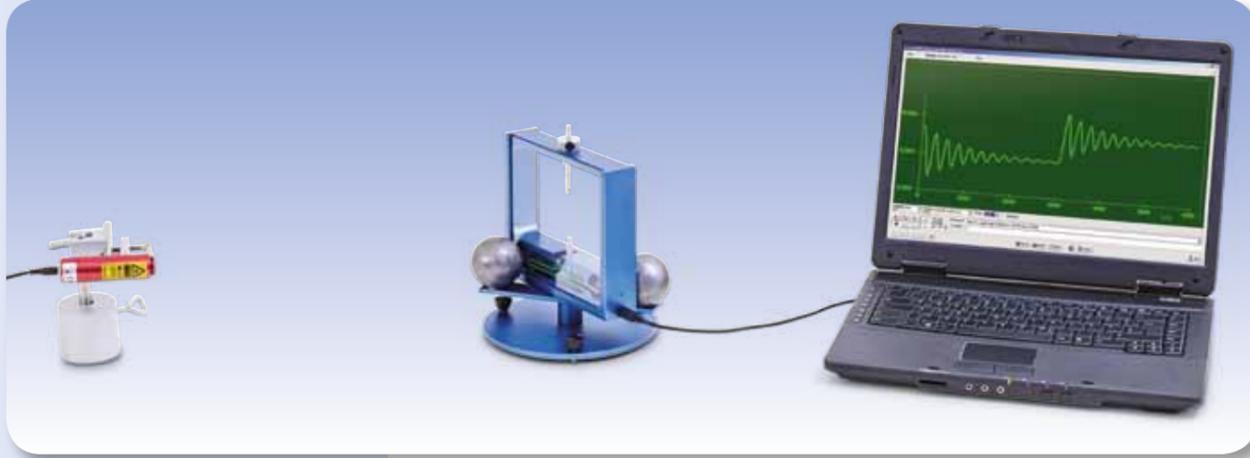


Fig. 5 Mesure d'un décrochement



## EXERCICES

- Déterminer la position d'équilibre initiale du pendule de torsion.
- Enregistrer l'oscillation du pendule de torsion autour de la position d'équilibre finale et déterminer la durée d'oscillation.
- Déterminer la position d'équilibre finale.
- Calculer la constante de gravitation  $G$ .

## OBJECTIF

Mesurer la force de gravité et déterminer la constante de gravitation avec la balance de torsion de Cavendish

## RESUME

Un pendule de torsion sensible sur lequel est monté une paire de petites sphères en plomb constitue le cœur de la balance de torsion de Cavendish. Ces petites sphères sont attirées par une paire de grosses sphères en plomb. C'est pourquoi la position des grandes sphères détermine la position d'équilibre du pendule de torsion. Lorsque les grosses sphères sont placées dans une deuxième position, symétrique par rapport aux petites masses, le pendule de torsion, après une phase d'oscillation de transition, prend une nouvelle position d'équilibre. Les deux positions d'équilibre et les dimensions géométriques de l'agencement permettent de déterminer la constante de gravitation. L'équilibre entre la force de gravitation et le couple de rappel du fil de torsion est un élément essentiel. Les oscillations du pendule de torsion sont mesurées avec un capteur différentiel capacitif qui supprime la majeure partie du bruit et des vibrations du signal. Le fil de tungstène du pendule est choisi si fin que l'oscillation du pendule ne dure que quelques minutes, permettant ainsi d'observer plusieurs oscillations autour de la position d'équilibre en l'espace d'une heure.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre                    | Appareil                        | Référence |
|---------------------------|---------------------------------|-----------|
| 1                         | Balance de torsion de Cavendish | 1003337   |
| 1                         | Diode laser rouge de précision  | 1003201   |
| 1                         | Socle de serrage, 1000 g        | 1002834   |
| 1                         | Noix universelle                | 1002830   |
| 1                         | Tige statif, 100 mm             | 1002932   |
| <b>En plus recommandé</b> |                                 |           |
| 1                         | Pied à coulisse, 150 mm         | 1002601   |
| 1                         | Balance électronique 5000 g     | 1003434   |

## GENERALITES

Au cours de la mesure expérimentale des forces de gravitations entre deux masses, toutes les masses environnantes exercent une influence perturbatrice. On peut quasiment surmonter ce problème avec la balance de torsion de Cavendish, car dans ce cas on effectue deux mesures avec des positions symétriques des masses.

Un pendule de torsion sensible sur lequel est monté une paire de petites sphères en plomb constitue le cœur de la balance de torsion de Cavendish. Ces petites sphères sont attirées par une paire de grosses sphères en plomb. C'est pourquoi la position des grandes sphères détermine la position d'équilibre du pendule de torsion. Lorsque les grosses sphères sont placées dans une deuxième position, symétrique par rapport aux petites masses, le pendule de torsion, après une phase d'oscillation de transition, prend une nouvelle position d'équilibre. Les deux positions d'équilibre et les dimensions géométriques de l'agencement permettent de déterminer la constante de gravitation. L'équilibre entre la force de gravitation et le couple de rappel du fil de torsion est un élément essentiel. La force de gravitation est fournie par

$$(1) \quad F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

$G$  : constante de gravitation,  
 $m_1$  : masse d'une petite sphère en plomb,  
 $m_2$  : masse d'une grande sphère en plomb,  
 $d$  : écart entre une petite et une grande sphère dans la position de mesure

Elle dévie le pendule de torsion de sa position zéro lorsque les grosses sphères se trouvent en position de mesure. Pour le couple de rotation déviant, on a

$$(2) \quad M_1 = 2 \cdot F \cdot r$$

$r$  : distance entre la petite sphère et le système d'accrochage du fléau  
 La déviation du pendule de torsion de l'angle  $\varphi$  entraîne l'action du couple de rotation de rappel

$$(3) \quad M_2 = D \cdot \varphi$$

$D$  : référence angulaire du

fil fin de tungstène auquel est accroché le fléau du pendule de torsion. Dans la position d'équilibre,  $M_1$  et  $M_2$  coïncident. La référence angulaire  $D$  peut être déterminée avec la durée d'oscillation  $T$  pendant laquelle le pendule oscille autour de sa position d'équilibre.

$$(4) \quad D = J \cdot \frac{4\pi^2}{T^2}$$

Le moment d'inertie  $J$  est alors composé du moment d'inertie  $J_1$  des deux petites sphères en plomb et du moment d'inertie  $J_K$  du fléau

$$(5) \quad J = 2 \cdot m_1 \cdot r^2 + \frac{m_b}{12} \cdot (a^2 + b^2)$$

$m_b$  : masse du fléau  
 $a, b$  : longueur et largeur du fléau.

Deux positions de mesure symétriques, comportant deux angles de déviation  $\varphi$  et  $\varphi'$  ainsi que deux couples de déviation opposés, sont prévues pour les deux grandes sphères en plomb. L'équilibre résulte de (2) et (3).

$$(6) \quad 4 \cdot F \cdot r = D \cdot (\varphi - \varphi') = D \cdot \Delta\varphi$$

Au cours de l'expérience, les oscillations du pendule de torsion sont mesurées avec un capteur différentiel capacitif qui supprime la majeure partie du bruit et des vibrations du signal. Le fil de tungstène du pendule est choisi si fin que l'oscillation du pendule dure quelques minutes, permettant ainsi d'observer plusieurs oscillations autour de la position d'équilibre en l'espace d'une heure.

Fixé au pendule de torsion, un miroir peut être utilisé pour l'associer à un indicateur de lumière qui permettra de suivre les oscillations à l'œil nu. L'ajustage et le calibrage de la balance de torsion en sont sensiblement facilités.

## EVALUATION

À partir des équations (1), (4), (5) et (6), on obtient :

$$G = \frac{\Delta\varphi \cdot d^2 \cdot \pi^2}{m_2 \cdot T^2} \cdot \left( 2 \cdot r + \frac{1}{12} \cdot \frac{m_b}{m_1} \cdot \frac{a^2 + b^2}{r} \right)$$

Cependant, on n'a pas encore tenu compte de ce que chacune des deux petites sphères en plomb est attirée par la grande sphère éloignée et que, par conséquent, le couple de rotation agissant sur le pendule de torsion est un peu plus petit que celui qui a été calculé jusqu'à maintenant. Il est possible de corriger l'équation (2) sans problème, car on connaît toutes les distances.

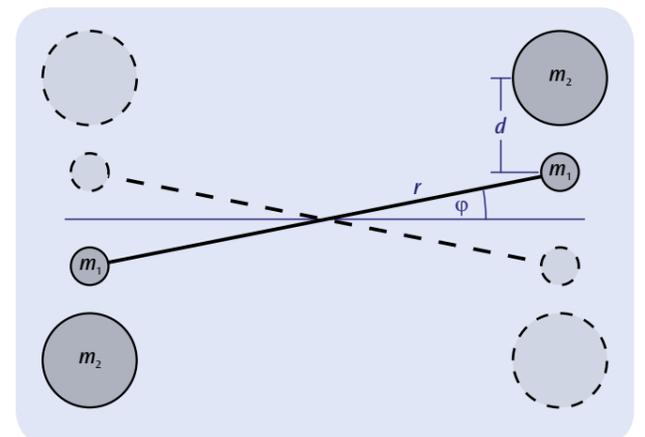


Fig. 1 : Représentation schématique de l'agencement de mesure dans la balance de torsion de Cavendish

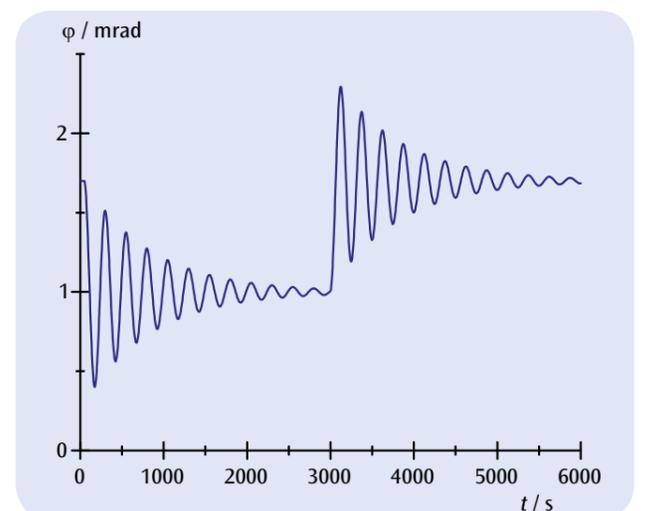


Fig. 2 : Angle de déviation du pendule de torsion en fonction du temps après deux changements de la position de mesure pour les grandes sphères en plomb



## EXERCICES

- Mesure de la force motrice  $F_1$  par rapport à la force résistante (charge)  $F_2$ , du bras de levier résistant (bras de charge)  $x_2$  et du bras de levier moteur (bras de force)  $x_1$  pour un levier simple.
- Mesure de la force motrice  $F_1$  par rapport à la force résistante (charge)  $F_2$ , du bras de levier résistant  $x_2$  et du bras de levier moteur  $x_1$  pour un levier double.

## OBJECTIF

Confirmer le principe des leviers

## RESUME

De l'équilibre des moments des forces mécaniques découle le principe des leviers, qui vaut aussi bien pour les leviers simples que les leviers doubles. Ce principe physique est à la base de nombreux systèmes mécaniques mettant en œuvre un transfert des forces.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                      | Référence |
|--------|-------------------------------|-----------|
| 1      | Bras de levier                | 1008539   |
| 1      | Dynamomètre de précision, 2 N | 1003105   |
| 1      | Dynamomètre de précision, 5 N | 1003106   |

# 1

## GENERALITES

Le levier est constitué d'un objet rigide placé sur un point d'appui fixe de manière à pivoter autour de l'axe. Il sert au levage ou au déplacement de charges. Les bras de levier sont les distances entre le point d'appui (axe de rotation) et les extrémités où sont appliquées la force motrice et la force résistante. C'est pourquoi ils sont appelés bras de levier moteur (ou bras de force) et bras de levier résistant (ou bras de charge). Dans le cas du levier simple, la force motrice  $F_1$  et la force résistante (charge)  $F_2$  s'exercent du même côté de l'axe de rotation mais dans le sens opposé. Dans le cas du levier double, la force motrice  $F_1$  et la force résistante (charge)  $F_2$  s'exercent de part et d'autre de l'axe de rotation.

Pour ces deux types de leviers, l'équilibre des moments engendre le principe du levier :

$$(1) \quad F_1 \cdot x_1 = F_2 \cdot x_2$$

Ce principe physique constitue la base de nombreux systèmes mécaniques impliquant un transfert des forces.

## EVALUATION

À partir des valeurs mesurées, on calcule les produits  $F_1 \cdot x_1$  et  $F_2 \cdot x_2$  puis on les compare.

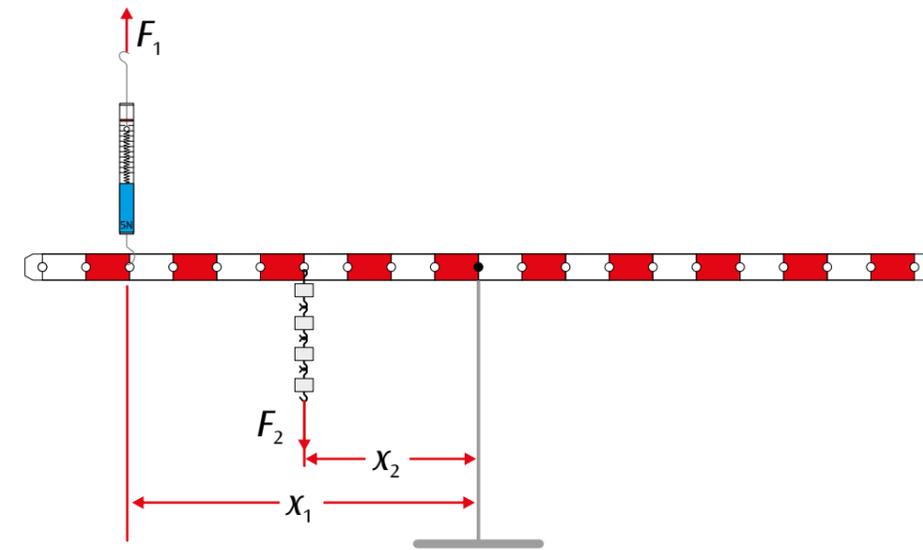


Fig. 1 Levier simple

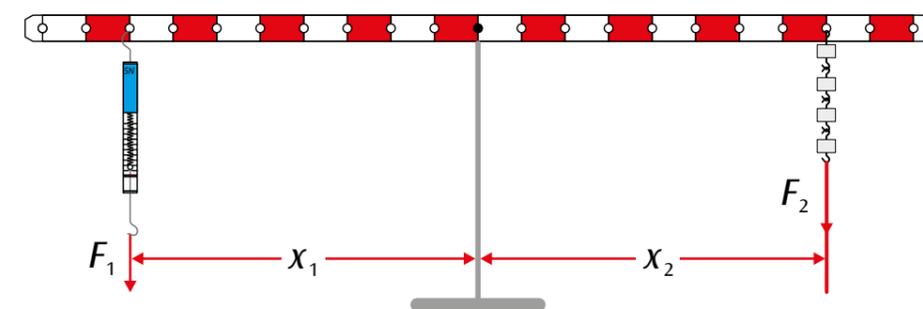


Fig. 2 Double levier



## EXERCICES

- Examen graphique de trois forces différentes quelconques en équilibre.
- Examen analytique de l'équilibre en présence d'un alignement symétrique de  $F_1$  et de  $F_2$ .

## OBJECTIF

Analyse expérimentale de l'addition vectorielle de forces

## RESUME

La table des forces permet une vérification simple et transparente de l'addition vectorielle des forces. Le point d'application de trois forces différentes devra exactement se trouver au centre si ces forces sont en équilibre. Nous déterminons les valeurs des forces différentes créées par les masses suspendues et relevons la direction qu'elles prennent, sous forme d'angle, sur une échelle angulaire graduée. L'évaluation des résultats expérimentaux pourra se faire graphiquement ou analytiquement.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil         | Référence |
|--------|------------------|-----------|
| 1      | Table des forces | 1000694   |

# 1

## GENERALITES

Les forces sont des vecteurs, ce qui signifie qu'elles seront additionnées conformément aux règles de l'addition vectorielle. Pour obtenir l'addition, le point initial du deuxième vecteur sera appliqué – sous forme d'interprétation graphique – au point final du premier vecteur. La flèche partant du point initial du premier vecteur et aboutissant au point final du deuxième vecteur représente le vecteur résultant. Si les deux vecteurs sont considérés comme les côtés d'un parallélogramme, le vecteur résultant est alors la diagonale (voire à l'illustration 1).

La table des forces permet une vérification simple et transparente de l'addition vectorielle des forces. Le point d'application de trois forces différentes devra exactement se trouver au centre si ces forces sont en équilibre. Nous déterminons les valeurs des forces différentes créées par les masses suspendues et relevons la direction qu'elles prennent, sous forme d'angle, sur une échelle angulaire graduée. Si des forces différentes sont en équilibre, leur somme est égale à :

$$(1) \quad F_1 + F_2 + F_3 = 0$$

La force  $-F_3$  est donc la somme des forces différentes  $F_1$  et  $F_2$  (voire l'illustration 2) :

$$(2) \quad -F_3 = F = F_1 + F_2$$

Pour la composante vectorielle parallèle à la somme  $F$ , l'équation suivante s'applique :

$$(3) \quad -F_3 = F = F_1 \cdot \cos \alpha_1 + F_2 \cdot \cos \alpha_2$$

et pour la composante perpendiculaire correspondante, l'équation suivante s'applique :

$$(4) \quad 0 = F_1 \cdot \sin \alpha_1 + F_2 \cdot \sin \alpha_2$$

Les équations (3) et (4) offrent une description analytique de l'addition vectorielle. Pour procéder à une vérification expérimentale, il est préférable d'appliquer la force  $F_3$  à l'angle 0.

Alternativement à l'examen analytique, il sera également possible de procéder à un examen graphique de l'équilibre des forces. Dans ce but, toutes les trois forces seront d'abord tracées avec leurs valeurs et leurs angles respectifs en partant du point central d'application. Les forces  $F_2$  et  $F_3$  seront ensuite déplacées parallèlement jusqu'à ce que le point initial se trouve à l'extrémité du vecteur précédent. Le résultat attendu est le vecteur résultant 0 (voire l'illustration 3). Dans cet essai expérimental, ce phénomène sera observé pour trois forces différentes quelconques maintenant l'équilibre, l'examen analytique se limite au cas spécial où les deux forces  $F_1$  et  $F_2$  sont symétriques par rapport à  $F_3$ .

## EVALUATION

Dans le cas symétrique ( $F_1 = F_2$  et  $\alpha_1 = -\alpha_2$ ), l'équation (4) est trivialement satisfaite. L'équation (3) permet d'obtenir l'équation de détermination pour la force totale, utilisée dans l'illustration 4 afin de décrire les données de mesure :

$$F = 2 \cdot F_1 \cdot \cos \alpha_1$$

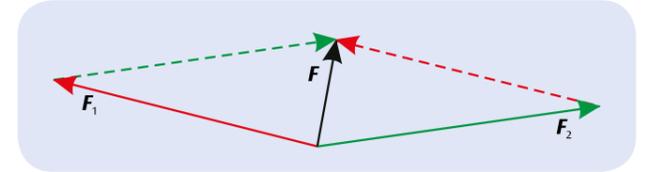


Fig. 1 Addition vectorielle de forces (parallélogramme des forces)

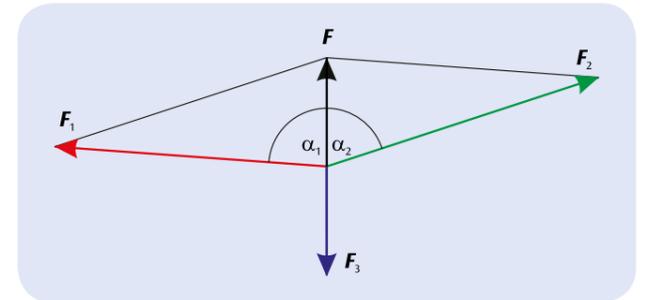


Fig. 2 Détermination de la somme vectorielle de deux forces  $F_1$  et  $F_2$  à partir de la force  $F_3$  maintenant l'équilibre

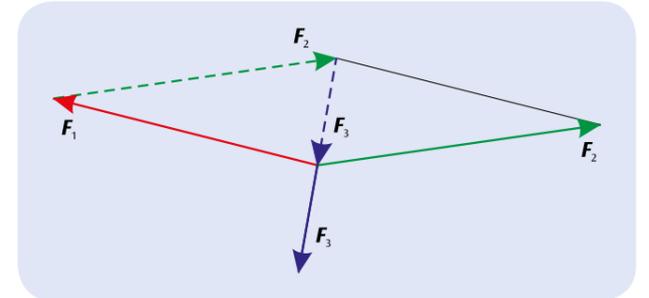


Fig. 3 Examen graphique de l'équilibre de trois forces différentes à orientation quelconque

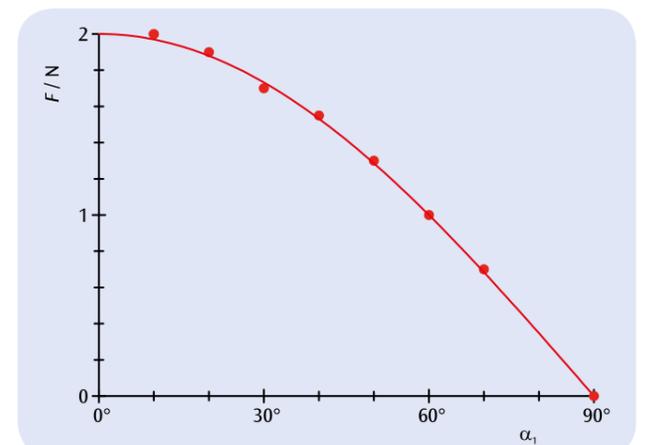


Fig. 4 Somme mesurée et calculée de deux forces symétriques en fonction de l'angle d'ouverture  $\alpha_1$



## EXERCICES

- Mesure de la force résultante  $F_1$  d'un corps en fonction de l'angle  $\alpha$  sur le plan incliné.
- Représentation du rapport de la force résultante  $F_1$  avec le poids  $G$  en fonction de sinus  $\alpha$ .

## OBJECTIF

Déterminer la force résultante

## RESUME

Si un objet posé sur un plan incliné doit être déplacé sans frottement vers le haut, ce n'est pas le poids  $G$  de l'objet qui doit être vaincue, mais la force résultante  $F_1$ . Elle s'exerce parallèlement au plan incliné et sa valeur est toujours inférieure à celle du poids. Cela vaut d'autant plus que l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du plan est petit.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                      | Référence |
|--------|-------------------------------|-----------|
| 1      | Plan incliné                  | 1003213   |
| 1      | Dynamomètre de précision, 5 N | 1003106   |
| 1      | Jeu de masses de 1 g à 500 g  | 1010189   |

1

## GENERALITES

Si un objet posé sur un plan incliné doit être déplacé sans frottement vers le haut, ce n'est pas le poids  $G$  de l'objet qui doit être vaincue, mais la force résultante  $F_1$ . Elle s'exerce parallèlement au plan incliné et sa valeur est toujours inférieure à celle du poids. En tant que différence vectorielle entre le poids et la force résultante, on a la force normale  $F_2$  qui s'exerce perpendiculairement au plan incliné (voir Fig. 1).

Pour les forces, on a les équations :

$$(1) \quad F_1 = G \cdot \sin \alpha$$

et

$$(2) \quad F_2 = G \cdot \cos \alpha .$$

La force résultante est donc d'autant plus faible que l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du plan est petit.

Dans l'expérience, le corps est accroché à un fil qu'on a fait passer autour d'une poulie de renvoi. La force résultante est compensée par le poids des masses disposées sur une assiette suspendue à l'autre extrémité du fil. Étant donné que le frottement sur le plan incliné joue un rôle, on prend comme valeur de mesure de la force résultante la moyenne des deux forces de limitation qui ne font pas descendre le corps vers le bas et/ou ne le tirent pas vers le haut. Le poids de l'objet  $G$  est auparavant déterminé au moyen d'un dynamomètre. Le poids du plateau est également pris en compte. L'angle d'inclinaison  $\alpha$  peut être lu sur une échelle angulaire.

## EVALUATION

Pour l'analyse, les forces résultantes  $F_1$  mesurées pour plusieurs angles d'inclinaison sont mises en relation avec le poids  $G$  de l'objet et appliquées par rapport au sinus de l'angle dans un graphe. Les valeurs mesurées se situent dans les limites de la précision de mesure sur une droite passant par l'origine.

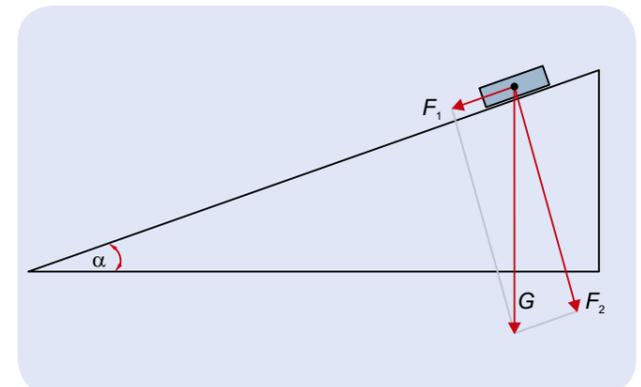


Fig. 1 Décomposition vectorielle du poids  $G$  en force résultante  $F_1$  et force normale  $F_2$

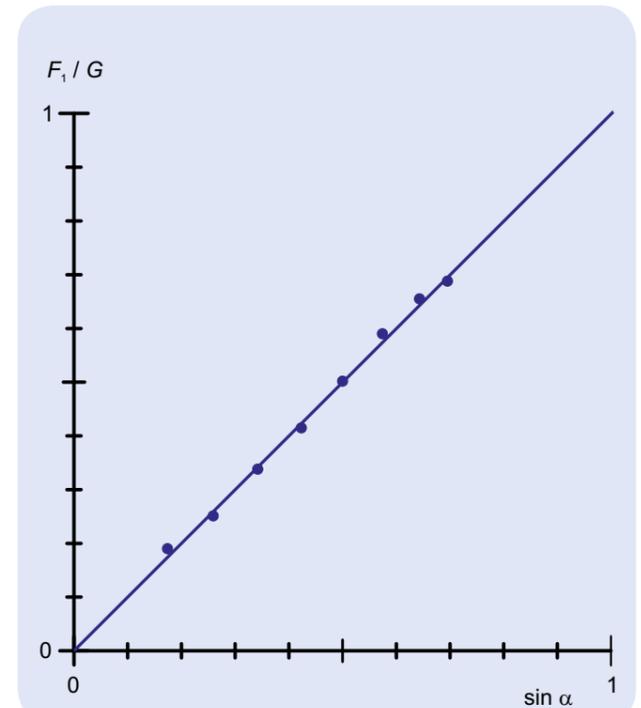
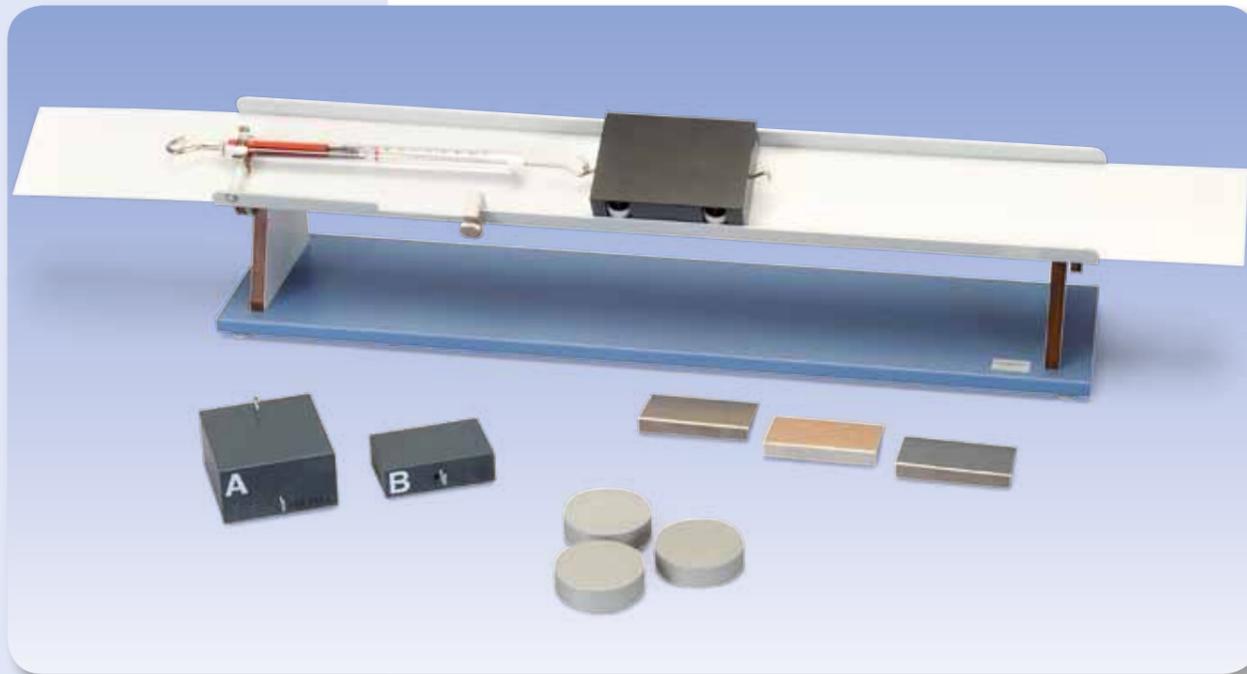


Fig. 2 Rapport entre la force résultante  $F_1$  et le poids  $G$  en fonction du sinus  $\alpha$



EXERCICES

- Comparaison entre les frictions par adhérence et de glissement.
- Mesure de la force de friction de glissement en fonction de la surface d'appui.
- Mesure de la force de friction de glissement en fonction de la combinaison de matières.
- Mesure de la force de friction de glissement en fonction de la force d'application.

OBJECTIF

Mesure des forces de friction

RESUME

Pour mesurer la force de friction de glissement, on utilise un tribomètre à languette mobile passant à vitesse constante sous un corps de friction au repos relié à un dynamomètre. Le parcours de friction peut être incliné en continu sur l'axe longitudinal pour permettre de varier la force d'application.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil   | Référence |
|--------|------------|-----------|
| 1      | Tribomètre | 1009942   |



GENERALITES

Pour déplacer un corps au repos sur un support plan, il faut surmonter une force de retenue due à la friction par adhérence du corps sur le support. Pour poursuivre le déplacement du corps sous forme d'un mouvement de glissement continu, il faut appliquer une force  $F_{Dyn}$  pour compenser la friction de glissement. Cette force est inférieure à la force  $F_{Stat}$  requise pour surmonter la friction par adhérence, car le contact superficiel du corps glissant avec le support est moins intensif.

Les deux forces dépendent de la taille de la surface d'appui et sont déterminées essentiellement par le type de matière et la rugosité des surfaces touchées. En outre, elles sont proportionnelles à la force d'appui  $F_N$  avec laquelle le corps s'appuie sur le support. Aussi introduit-on le coefficient de friction par adhérence  $\mu_{Stat}$  et le coefficient de friction de glissement  $\mu_{Dyn}$  pour écrire

$$(1) \quad F_{Stat} = \mu_{Stat} \cdot F_N \quad \text{et} \quad F_{Dyn} = \mu_{Dyn} \cdot F_N$$

Pour mesurer la force de friction de glissement, on utilise au cours de l'expérience un tribomètre à languette mobile passant à vitesse constante sous un corps de friction au repos relié à un dynamomètre. Les mesures sont réalisées pour différentes combinaisons de matières et surfaces d'appui. Le parcours de friction peut être incliné en continu sur l'axe longitudinal pour permettre de varier la force d'application.

EVALUATION

Lorsque le parcours de friction est incliné dans l'angle  $\alpha$ , la force d'appui pour un corps de friction de masse  $m$  est

$$F_N = m \cdot g \cdot \cos \alpha$$

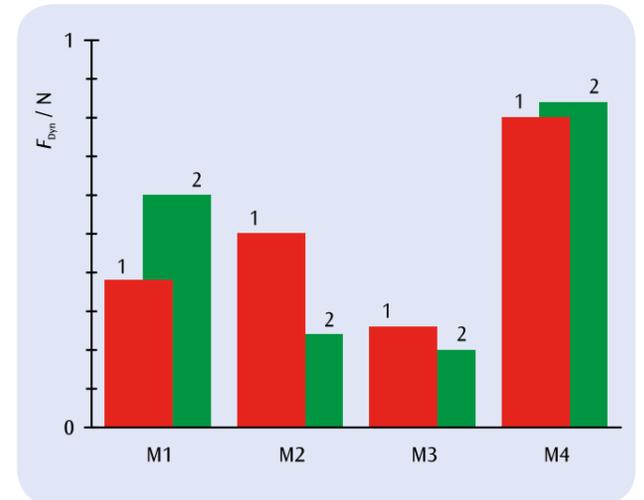


Fig. 1 Force de friction de glissement  $F_{Dyn}$  pour quatre matières différentes sur un support lisse (1) et un support rugueux (2)

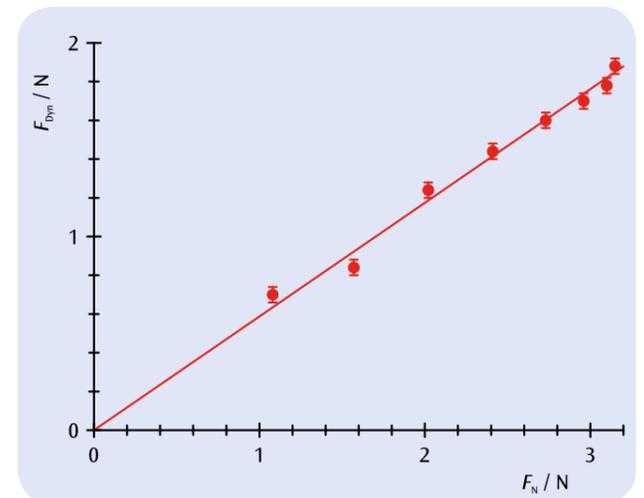


Fig. 2 Force de friction de glissement  $F_{Dyn}$  en fonction de la force d'appui  $F_N$

**OBJECTIF**

Déterminer la force de poussée en fonction de la profondeur d'immersion

**RESUME**

Selon le principe d'Archimède, un objet immergé dans un fluide subit une force dirigée vers le haut  $F_G$ , ou poussée, qui est égale au poids du volume de fluide déplacé. Pour un corps immergé de forme régulière, la poussée est proportionnelle à la profondeur d'immersion  $h$  tant que celle-ci est inférieure à la hauteur  $H$ .


**EXERCICES**

- Mesure de la force exercée sur un corps immergé dans l'eau.
- Détermination de la force de poussée et confirmation de la proportionnalité entre la force de poussée et la profondeur d'immersion.
- Détermination de la densité de l'eau.

**1**
**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre | Appareil                                 | Référence |
|--------|--|-----------|
| 1      | Corps submersible Al 100 cm <sup>3</sup> | 1002953   |
| 1      | Dynamomètre de précision, 5 N            | 1003106   |
| 1      | Pied à coulisse, 150 mm                  | 1002601   |
| 1      | Jeu de 10 béchers, forme élevée          | 1002873   |
| 1      | Laborboy II                              | 1002941   |
| 1      | Socle pour statif, trépied, 150 mm       | 1002835   |
| 1      | Tige statif, 750 mm                      | 1002935   |
| 1      | Noix de serrage avec crochet             | 1002828   |

**GENERALITES**

Selon le principe d'Archimède, une force dirigée vers le haut  $F_G$  s'exerce sur un objet plongé dans un fluide. Cette force de poussée est égale au poids du fluide que l'objet déplace.

Pour un corps immergé de forme régulière d'une surface de section  $A$  et d'une hauteur  $H$ , plongé dans l'eau jusqu'à une profondeur  $h$ , on a :

$$(1) \quad F_G = \rho \cdot g \cdot A \cdot h, \text{ pour } h < H$$

et

$$(2) \quad F_G = \rho \cdot g \cdot A \cdot H, \text{ pour } h > H$$

Pour l'expérience, on utilise un parallélépipède d'un poids  $F_0$ . Avec la force

$$(3) \quad F(h) = F_0 - F_G(h)$$

il tire sur un dynamomètre tandis qu'il est immergé dans l'eau jusqu'à une profondeur  $h$ .

**EVALUATION**

Les valeurs mesurées pour la force de poussée en fonction de la profondeur d'immersion  $h/H$  sont situées sur une droite passant par l'origine avec la pente

$$a = \rho \cdot g \cdot A \cdot H$$

A partir de la pente, on peut donc calculer la densité de l'eau.

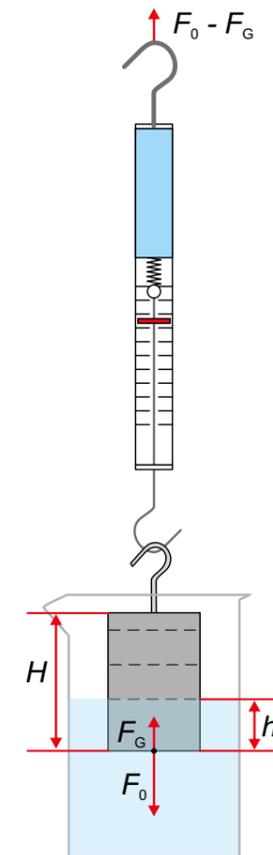
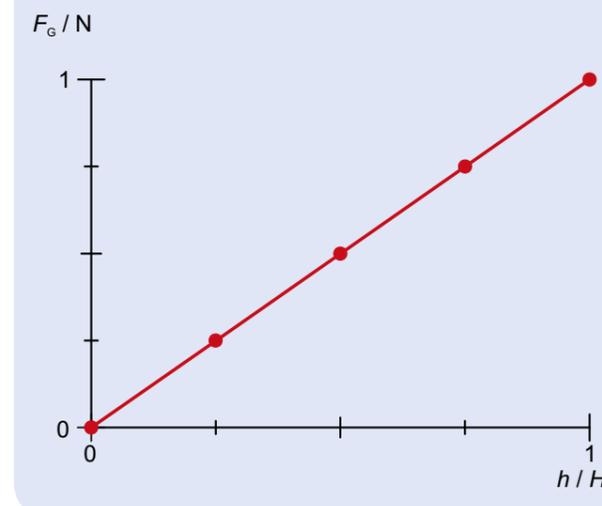
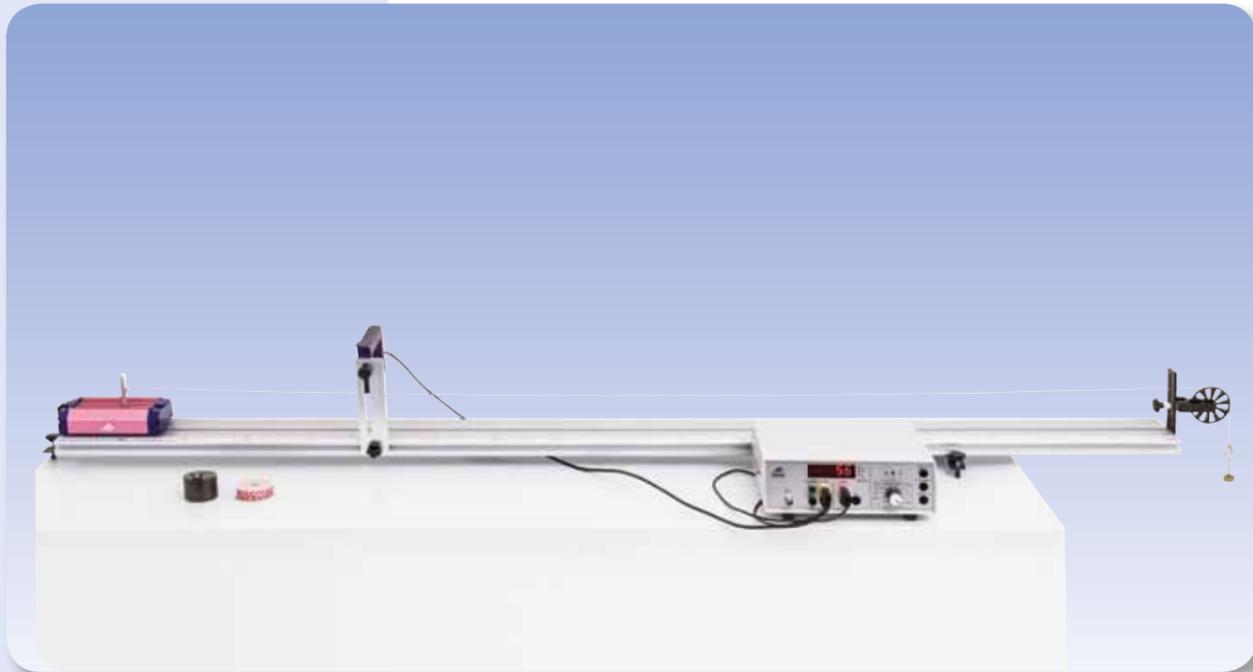


Fig. 2 Représentation schématique


 Fig. 1 Force de poussée  $F_G$  comme fonction de la profondeur d'immersion relative  $h/H$ 

EXERCICES

- Analyse de mouvements de translation rectilignes uniformes en fonction de la masse accélératrice.
- Analyse de mouvements de translation rectilignes uniformes en fonction de la masse accélérée.

OBJECTIF

Mesure de la vitesse instantanée en fonction de la trajectoire parcourue

RESUME

Pour un mouvement de translation rectiligne uniforme, la vitesse instantanée est d'autant plus élevée que la distance parcourue est longue. Le facteur de proportionnalité entre le carré de la vitesse et la trajectoire permet de calculer l'accélération. Ce phénomène est étudié grâce à l'expérience du chariot sur rail. Afin de mesurer la vitesse instantanée, un rupteur de largeur connue fixé au chariot interrompt une barrière lumineuse. La durée de l'interruption est mesurée au moyen d'un compteur numérique.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                             | Référence  |
|--------|--------------------------------------|------------|
| 1      | Banc de mécanique                    | 1003318    |
| 1      | Barrière photoélectrique             | 1000563    |
| 1      | Compteur numérique (230 V, 50/60 Hz) | 1001033 ou |
|        | Compteur numérique (115 V, 50/60 Hz) | 1001032    |
| 1      | Jeu de masses à fente 10 x 10 g      | 1003227    |
| 1      | Paire de cordons de sécurité, 75 cm  | 1002849    |
| 1      | Cordon expérimental                  | 1001055    |



GENERALITES

Pour un mouvement de translation uniforme de vitesse constante, la vitesse instantanée  $v$  et la distance parcourue  $s$  augmentent avec le temps. Par conséquent, la vitesse est d'autant plus élevée que la distance parcourue est longue.

Après écoulement du temps  $t$ , la vitesse instantanée est de

$$(1) \quad v(t) = a \cdot t$$

et la distance parcourue de

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

Donc, on a

$$(3) \quad v(s) = \sqrt{2 \cdot a \cdot s}$$

ou

$$(4) \quad v^2(s) = 2 \cdot a \cdot s$$

Pour la mesure de la vitesse instantanée

$$(5) \quad v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

un rupteur de largeur connue  $\Delta s$  fixé au chariot interrompt une barrière lumineuse dans l'expérience du rail à chariot. La durée de l'interruption  $\Delta t$  est mesurée au moyen d'un compteur numérique.

EVALUATION

Si on applique les carrés des vitesses instantanées mesurées aux temps d'interruption aux distances parcourues, on doit s'attendre à un rapport linéaire si la vitesse d'accélération est constante conformément à l'équation 4. La pente de la droite passant par l'origine correspond au double de la valeur de l'accélération.

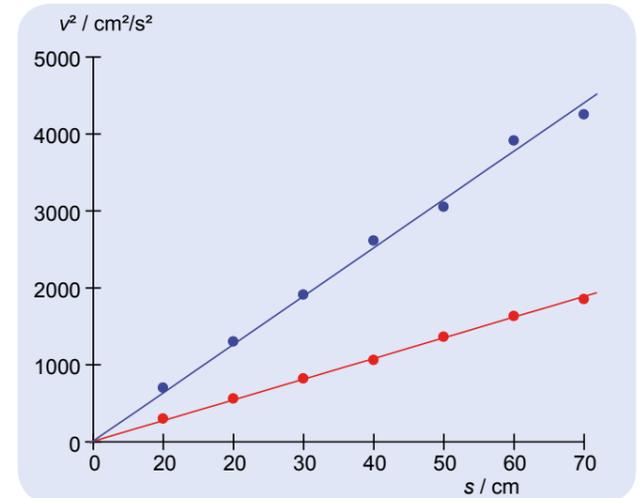


Fig. 2 Courbe  $v^2$ - $s$  pour  $m_2 = 500$  g.  $m_1 = 10$  g (rouge), 20 g (bleu)

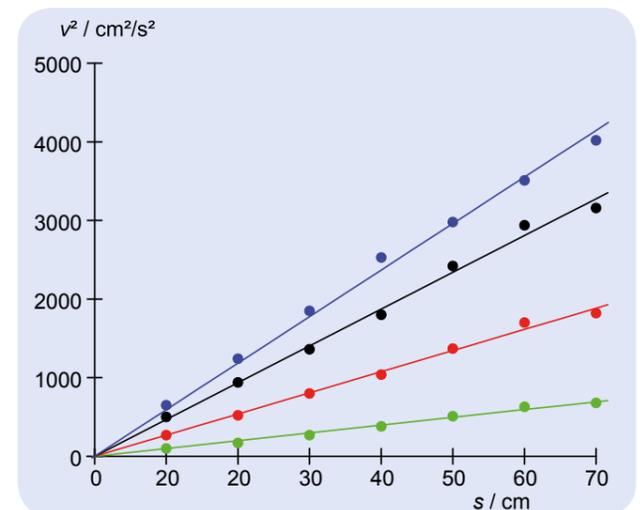


Fig. 3 Courbe  $v^2$ - $s$  pour  $m_2 = 1\ 000$  g.  $m_1 = 10$  g (vert), 20 g (rouge), 30 g (noir), 40 g (bleu)



Fig. 1 Représentation schématique



## EXERCICES

- Enregistrer la trajectoire d'un mouvement en fonction du temps.
- Déterminer la vitesse instantanée en fonction du temps.
- Déterminer l'accélération instantanée en fonction du temps.
- Déterminer l'accélération moyenne comme paramètre d'adaptation et comparer avec le quotient de la force par la masse.

## OBJECTIF

Enregistrement et analyse de mouvements uniformément accélérés sur un rail à faible frottement

## RESUME

La vitesse instantanée d'un mouvement uniformément accéléré est proportionnelle au temps de déplacement et la distance parcourue est proportionnelle au carré du temps de déplacement. Ces phénomènes sont étudiés au cours de l'expérience sur les déplacements d'un chariot sur un rail à faible frottement, ces mouvements étant enregistrés au moyen d'un système combinant une poulie à rayons et une barrière lumineuse.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                        | Référence  |
|--------|---------------------------------|------------|
| 1      | Banc de mécanique               | 1003318    |
| 1      | 3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)    | 1000540 ou |
|        | 3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)    | 1000539    |
| 1      | 3B NETlab™                      | 1000544    |
| 1      | Barrière photoélectrique        | 1000563    |
| 1      | Ficelle, 100 m                  | 1007112    |
| 1      | Jeu de masses à fente 10 x 10 g | 1003227    |

# 1

## GENERALITES

La vitesse instantanée  $v$  et l'accélération instantanée  $a$  d'un point matériel masse  $m$  sont définies comme des dérivées partielles de premier et de second ordre de la distance parcourue  $s$  en fonction du temps de déplacement  $t$ . Ces définitions peuvent être vérifiées par des expériences, où l'on considère les quotients différentiels au lieu des dérivées, et où la distance parcourue est divisée selon un quadrillage très fin afin de mesurer les instants  $t_n$  correspondant aux points du quadrillage  $s_n$ . Ainsi, les conditions sont posées pour permettre l'étude expérimentale par exemple de l'évolution dans le temps de mouvements uniformément accélérés.

Pour une accélération constante  $a$ , la vitesse instantanée  $v$  augmente proportionnellement au temps  $t$ , si le point de masse était au repos au départ :

$$(1) \quad v = a \cdot t$$

La distance parcourue  $s$  augmente proportionnellement au carré du temps :

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

La cause d'une accélération constante est une force d'accélération  $F$  constante, à condition que la masse accélérée  $m$  ne soit pas modifiée :

$$(3) \quad a = \frac{F}{m}$$

Ces phénomènes sont étudiés au cours de l'expérience avec un chariot en mouvement sur un rail à faible frottement. Le chariot se déplace à une vitesse d'accélération constante parce qu'il est tiré par un fil à une force constante. Cette force est générée par le poids d'une masse accrochée au fil (cf. Fig. 1). La poulie sur laquelle s'enroule le fil est conçue comme une roue dont les rayons coupent successivement le faisceau de la barrière lumineuse. Une interface de mesure connectée au système mesure les instants  $t_n$  où le faisceau est interrompu et envoie les données pour analyse à un ordinateur. Le logiciel d'analyse calcule la distance parcourue à l'instant  $t_n$ , ainsi que les valeurs correspondantes de vitesse instantanée et d'accélération instantanée

$$(4a) \quad s_n = n \cdot \Delta$$

$$(4b) \quad v_n = \frac{\Delta}{t_{n+1} - t_{n-1}}$$

$$(4c) \quad a_n = \frac{\frac{\Delta}{t_{n+1} - t_n} - \frac{\Delta}{t_n - t_{n-1}}}{\frac{t_{n+1} - t_n}{2}}$$

$\Delta = 20$  mm: distance entre les rayons de roue

Les mesures sont effectuées pour différentes combinaisons de force d'accélération  $F$  et de masse accélérée  $m$ .

## EVALUATION

Le logiciel d'analyse fournit une représentation graphique des trois grandeurs  $s$ ,  $v$  et  $a$  en fonction du temps  $t$ . La validité des équations (1) et (2) est vérifiée en adaptant les fonctions correspondantes qui impliquent l'accélération  $a$  comme paramètre.

On pose  $m_1$  comme étant la masse du chariot et  $m_2$  la masse accrochée au fil. Étant donné que la masse  $m_2$  est également accélérée, on a dans l'équation (3) :

$$F = m_2 \cdot g \quad \text{et} \quad m = m_1 + m_2$$

On en déduit que

$$a = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot g$$

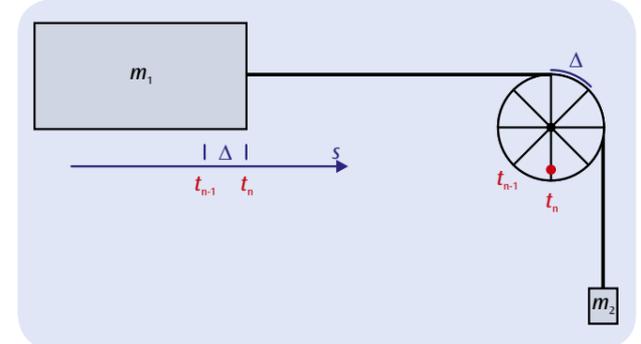


Fig. 1 Représentation schématique du principe de mesure

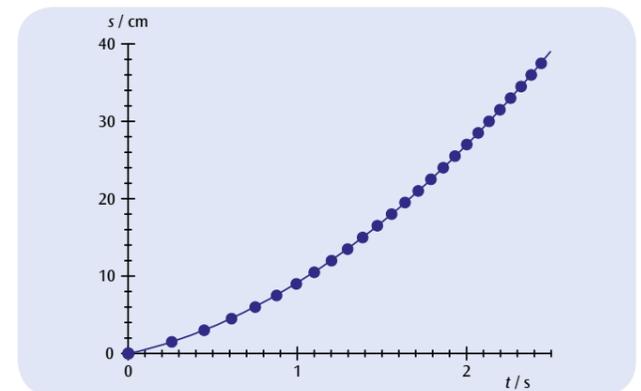


Fig. 2 Distance parcourue en fonction du temps

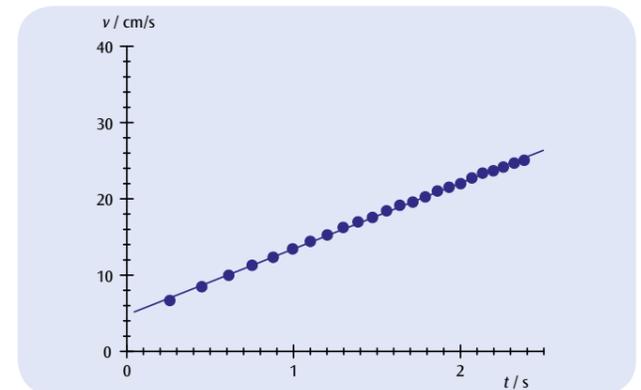


Fig. 3 Vitesse en fonction du temps

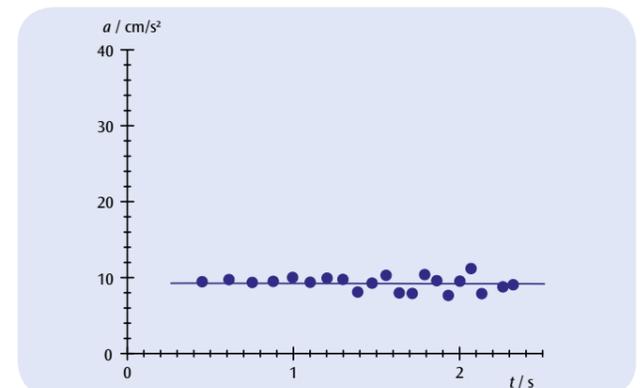
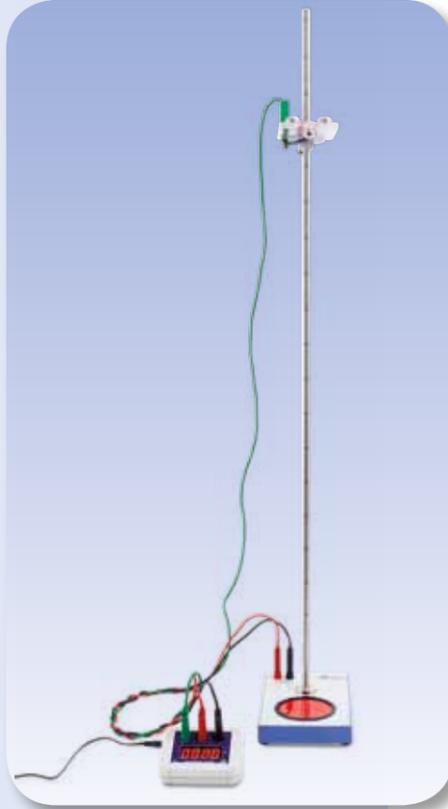


Fig. 4 Accélération en fonction du temps



## EXERCICES

- Mesure de la durée chute  $t$  d'une bille en fonction de l'écart  $h$  entre le dispositif de déclenchement et le plateau de réception.
- Enregistrement point par point du diagramme de distance et de temps d'un mouvement accéléré régulier.
- Confirmation de la proportionnalité entre la distance de la chute et le carré du temps de chute.
- Détermination de l'accélération de la pesanteur  $g$ .

## OBJECTIF

Détermination de l'accélération de la pesanteur

## RESUME

Dans le cas de la chute libre, la distance  $h$  est proportionnelle au carré de la durée de la chute  $t$ . Le facteur de proportionnalité permet de calculer l'accélération de la pesanteur  $g$ .

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                                    | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Dispositif de chute libre                   | 1000738    |
| 1      | Compteur de millisecondes (230 V, 50/60 Hz) | 1012833 ou |
|        | Compteur de millisecondes (115 V, 50/60 Hz) | 1012832    |
| 1      | Jeu de 3 cordons de sécurité                | 1002848    |

# 1

## GENERALITES

Lorsqu'un corps tombe dans le champ de gravitation depuis une hauteur  $h$  sur le sol, il subit une accélération constante  $g$ , tant que la vitesse de chute est faible et que le frottement peut donc être négligé. On appelle ce mouvement « chute libre ».

Au cours de l'expérience, une bille en acier est suspendue à un dispositif de déclenchement. Lorsque la chute libre est déclenchée, la mesure de temps électronique est activée en même temps. Après avoir parcouru une distance  $h$ , la bille tombe sur un plateau de réception et arrête la mesure du temps de chute  $t$ .

Comme la bille est déclenchée au moment  $t_0 = 0$  à la vitesse  $v_0 = 0$ , la distance parcourue pendant le temps  $t$  s'élève à

$$(1) \quad h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

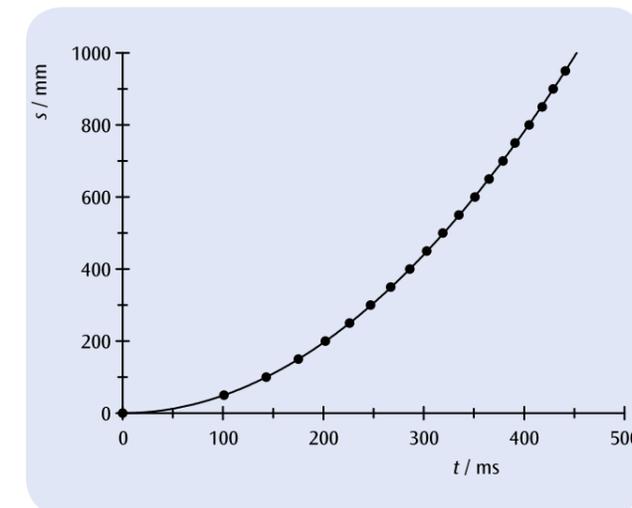


Fig. 1 Diagramme de distance et de temps de la chute libre

## EVALUATION

### Première variante :

Les temps de chute présentent un comportement 2 : 1 si les distances de chute présentent le comportement 4 : 1. La distance est donc proportionnelle au carré du temps de chute.

### Deuxième variante :

Les résultats de la mesure pour différentes distances de chute sont notés sous forme de paires de valeurs dans un diagramme de distance et de temps. La distance de chute parcourue  $h$  n'est pas une fonction linéaire du temps  $t$ , comme le confirme la comparaison entre l'adaptation d'une droite et d'une parabole aux valeurs de mesure. Pour obtenir une linéarisation, la distance de la chute est appliquée comme fonction du carré du temps de chute. La correspondance des droites initiales adaptées avec les valeurs mesurées est confirmée (1). La rampe des droites permet de calculer l'accélération de la pesanteur.

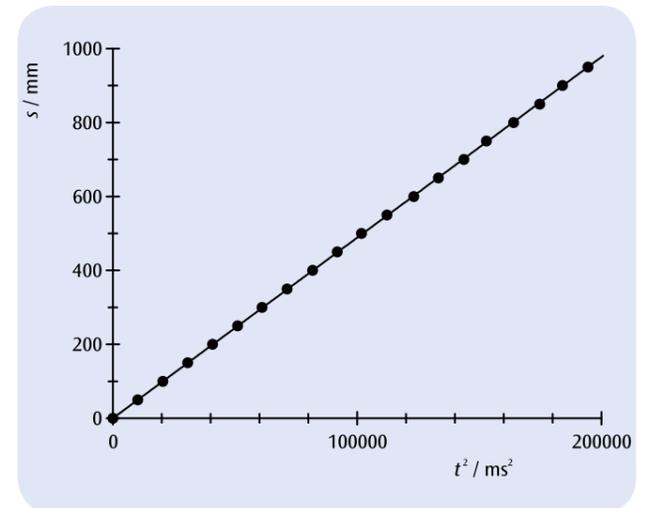
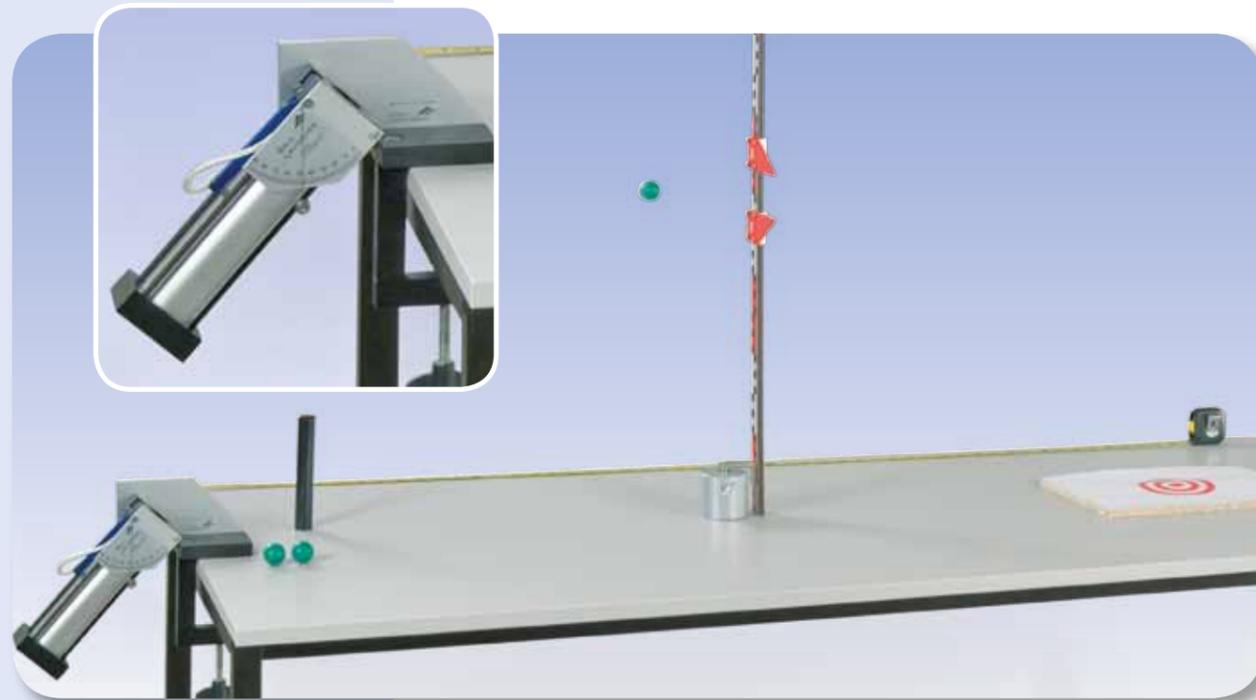


Fig. 2 Distance de chute comme fonction du carré du temps de chute



## EXERCICES

- Calcul de la portée du jet en fonction de l'angle et de la vitesse de jet.
- Calcul de la vitesse de jet à partir de la portée maximale du jet.
- Saisie point par point des « paraboles de jet » en fonction de l'angle et de la vitesse de jet.
- Validation du principe de superposition.

## OBJECTIF

Saisie point par point des « paraboles de jet »

## RESUME

Le mouvement d'une bille, lancée avec le champ de gravitation dans un certain angle par rapport au plan horizontal, suit une courbe de forme parabolique, dont la hauteur et la portée dépendent de l'angle et de la vitesse de jet. Il est mesuré point par point à l'aide d'une règle graduée verticale dotée de deux index.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                        | Référence |
|--------|---------------------------------|-----------|
| 1      | Lanceur balistique              | 1002654   |
| 1      | Support pour lanceur balistique | 1002655   |
| 1      | Règle graduée verticale, 1 m    | 1000743   |
| 1      | Jeu d'index pour règle graduée  | 1006494   |
| 1      | Pied en tonneau, 900 g          | 1002834   |
| 1      | Double mètre à ruban de poche   | 1002603   |

1

## GENERALITES

Le mouvement d'une bille lancée dans le champ de gravitation dans un certain angle par rapport au plan horizontal, se compose, selon le principe de superposition, d'un mouvement à vitesse constante dans le sens du jet et d'un mouvement de chute.

On obtient d'une courbe de forme parabolique, dont la hauteur et la portée dépendent de l'angle de jet  $\alpha$  et de la vitesse de jet  $v_0$ .

Pour calculer ce mouvement, on place dans un esprit de simplification, l'origine des axes de coordonnées au centre de la bille au moment du lancement et on néglige par ailleurs le frottement de l'air sur la bille. Elle conserve ensuite sa vitesse initiale dans le sens horizontal

$$(1) \quad v_x(0) = v_0 \cdot \cos \alpha$$

et atteint donc au moment  $t$  la distance horizontale.

$$(2) \quad x(t) = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t$$

Dans le sens vertical, sous l'influence du champ de gravitation, la bille subit l'accélération de chute  $g$ . Au moment  $t$ , sa vitesse est donc

$$(3) \quad v_y(t) = v_0 \cdot \sin \alpha - g \cdot t$$

et la distance verticale.

$$(4) \quad y(t) = v_0 \cdot \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

La courbe de vol de la bille a la forme d'une parabole étant donné qu'elle répond à l'équation.

$$(5) \quad y(x) = \tan \alpha \cdot x - \frac{1}{2} \cdot \frac{g}{(v_0 \cdot \cos \alpha)^2} \cdot x^2$$

Au moment

$$(6) \quad t_1 = \frac{v_0 \cdot \sin \alpha}{g}$$

la bille atteint le point le plus élevé de la parabole et au moment

$$(7) \quad t_2 = 2 \cdot \frac{v_0 \cdot \sin \alpha}{g}$$

la hauteur initiale 0. La hauteur de la parabole est donc

$$(8) \quad h = y(t_1) = \frac{v_0^2}{2 \cdot g} \cdot \sin^2 \alpha$$

et la portée

$$(9) \quad s = x(t_2) = 2 \cdot \frac{v_0^2}{g} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

Au cours de l'expérience, les courbes de vol d'une sphère en bois sont mesurées point par point en fonction de l'angle et de la vitesse de jet, en utilisant une règle graduée verticale dotée de deux index.

## EVALUATION

L'angle de jet  $\alpha = 45^\circ$  a permis d'atteindre la portée la plus grande  $s_{\max}$  de toutes les courbes de vol. Cette portée permet de calculer la vitesse de jet. Compte tenu de l'équation 9, on obtient

$$v_0 = \sqrt{g \cdot s_{\max}}$$

Une analyse exacte des données de mesure montre que même le frottement de l'air par la bille doit être pris en compte et que les courbes de vol divergent légèrement de la forme parabolique.

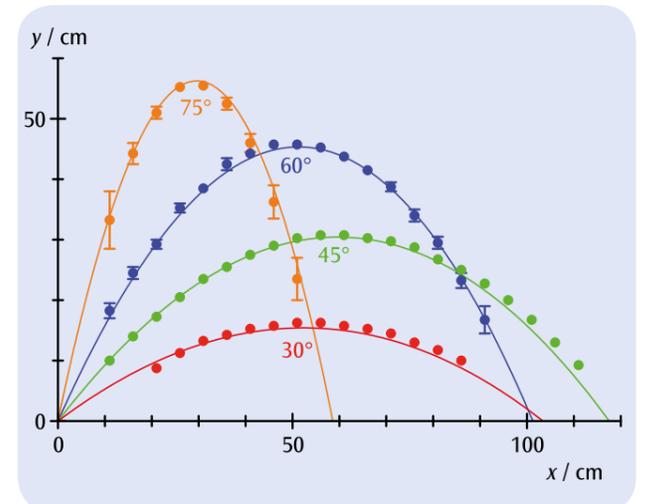


Fig. 1 Paraboles de jet mesurées en tenant compte du frottement de l'air à une vitesse de jet minimale et à divers angles de jet


**OBJECTIF**

Étudier les chocs élastiques et inélastiques de deux corps sur un plan

**RESUME**

Deux corps s'entrechoquant subissent la loi de conservation d'énergie et d'impulsion. Ces grandeurs permettent de décrire le mouvement des corps après le choc. Dans un plan, les vitesses et les impulsions des corps s'entrechoquant doivent être décrites vectoriellement. Une description particulièrement simple permet de passer au système de centre de gravité. Au cours de l'expérience, on fait entrer en collision deux disques sur une table à coussin d'air et on enregistre les vitesses en se servant d'un générateur d'étincelles.

**EXERCICES**

- Déterminer les vitesses avant et après un choc.
- Déterminer la conservation d'impulsion en cas de chocs élastiques et inélastiques.
- Déterminer la conservation d'énergie en cas de chocs élastiques et inélastiques.
- Étudier le mouvement du centre de gravité du système.

**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre                    | Appareil                                | Référence  |
|---------------------------|---|------------|
| 1                         | Table à coussin d'air (230 V, 50/60 Hz) | 1013210 ou |
|                           | Table à coussin d'air (115 V, 50/60 Hz) | 1012569    |
| 1                         | Paire de palets magnétiques             | 1003364    |
| <b>En plus recommandé</b> |   |            |
| 1                         | Balance pour laboratoires 610           | 1003419    |
| 1                         | Règle, 50 cm                            |            |
| 1                         | Goniomètre                              |            |

**GENERALITES**

Un choc décrit une brève interaction entre deux corps. On suppose que l'interaction n'a lieu que sur une période concrète et courte et que sinon les corps ne s'influencent pas. En cas d'absence de forces supplémentaires, les deux corps se déplacent à vitesse constante avant et après le choc. Comme les deux corps peuvent être considérés comme un système fermé, le processus est soumis à la loi de la conservation d'impulsion et d'énergie.

Les vitesses des corps 1 et 2 avant le choc sont décrites par les vecteurs  $v_1$  et  $v_2$  et après le choc par  $v'_1$  et  $v'_2$ . Les impulsions sont décrites par  $p_i$  et  $p'_i$  ( $i = 1, 2$ ). Les masses sont constantes dans le temps et sont désignées par  $m_1$  et  $m_2$ .

Sur la base de la conservation d'impulsion, on a

$$(1) \quad m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = m_1 \cdot v'_1 + m_2 \cdot v'_2$$

**1**

En outre, en présence de chocs élastiques, toute l'énergie cinétique du système est conservée :

$$(2) \quad \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_2^2 = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_1'^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_2'^2$$

Si le corps 2 est au repos avant le choc, on peut, sans perte de généralité, choisir le système de coordonnées de manière à ce que le corps 1 se déplace le long de l'axe x ( $v_{1y} = 0$ ).

Considérons d'abord un choc central avec  $d = 0$  (voir Fig. 1). Les corps se déplacent le long de l'axe x et, pour les vitesses après le choc, on a

$$(3) \quad v'_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_1$$

et

$$(4) \quad v'_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_1$$

Avec les mêmes masses  $m_1 = m_2$ , on obtient

$$(5) \quad v'_1 = 0$$

et

$$(6) \quad v'_2 = v_1$$

En cas de chocs non centraux avec les mêmes masses, les corps s'écartent l'un de l'autre avec un angle de  $90^\circ$ . Par conséquent

$$(7) \quad \theta_1 + \theta_2 = 90^\circ$$

De plus, à partir de (1) avec  $v_{1y} = 0$  et  $m_1 = m_2$

$$(8) \quad v'_{1y} = -v'_{2y}$$

Le rayon vecteur du centre de gravité est

$$(9) \quad r_s = \frac{m_1 \cdot r_1 + m_2 \cdot r_2}{m_1 + m_2}$$

Comme l'impulsion totale est conservée, la vitesse du centre de gravité

$$(10) \quad v_s = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2}$$

est constante. L'impulsion totale correspond à l'impulsion d'une masse  $m_s = m_1 + m_2$  qui se déplace à la vitesse de centre de gravité.

Il est souvent judicieux de passer au système de centre de gravité. Là, les deux masses sont attirées l'une vers l'autre avant le choc, de sorte que l'impulsion totale est nulle. Après le choc élastique, elles s'écartent l'une de l'autre, de sorte que l'impulsion totale reste nulle. Après un choc complètement inélastique, elles tournent en adhérant l'une à l'autre autour du centre de gravité. L'énergie cinétique du système est conservée.

Au cours de l'expérience, on fait entrer en collision deux disques sur une table à coussin d'air et on enregistre leur mouvement en se servant d'un générateur d'étincelles.

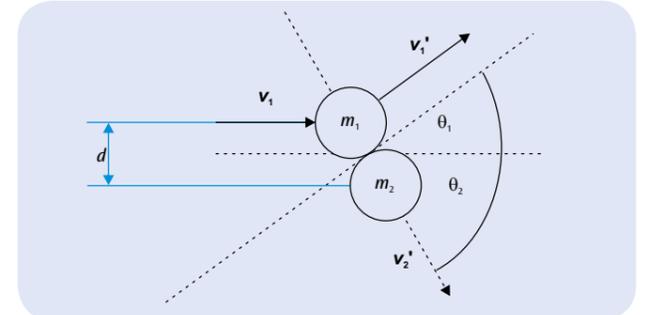


Fig. 1 Représentation schématique du choc non central de deux masses

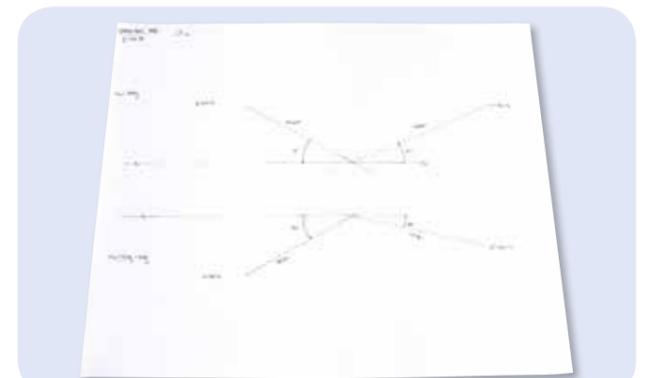
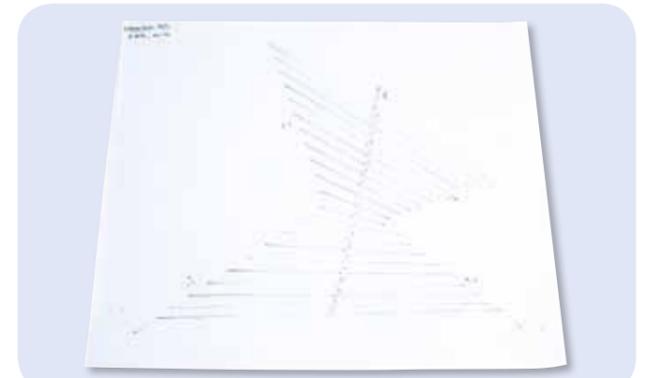

 Fig. 2 Enregistrement et exploitation d'un choc non central de deux masses inégales à des vitesses initiales  $v_1 \neq 0$  et  $v_2 = 0$ 


Fig. 3 Position du centre de gravité des masses S

**EVALUATION**

Une exploitation de l'énergie cinétique permet de relever des pertes qui sont dues à la génération de l'onde acoustique produite au moment du choc, à des déformations minimales résultant du choc, à la propre rotation non enregistrée des masses et au mouvement des tuyaux d'alimentation d'air.

La vitesse est calculée à partir de

$$v = \Delta \cdot f.$$

$\Delta$  : écart entre deux points,

$f$  : fréquence du générateur d'étincelles

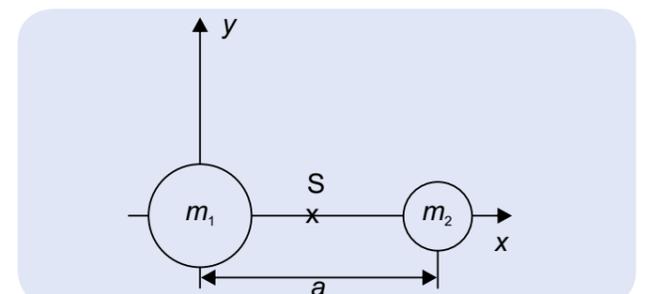


Fig. 4 Mouvement du centre de gravité des masses S avant et après le choc


**OBJECTIF**

Validation de la loi des aires pour les mouvements à force centrale (deuxième loi de Kepler)

**RESUME**

Pour illustrer le mouvement à force centrale, on procède à la saisie du mouvement elliptique d'un corps pendulaire selon la méthode du marquage à poudre. Cette méthode consiste à créer une trace poudreuse avec des repères de temps dont la distance spatiale permet de relever directement la vitesse du corps pendulaire. Une analyse graphique simple montre en outre que l'aire balayée par le rayon vecteur du corps pendulaire par intervalle de temps est constante et qu'elle dépend par conséquent de la longueur du rayon vecteur.

**EXERCICES**

- Saisie de l'oscillation elliptique d'un pendule selon la méthode du marquage à poudre.
- Comparaison des vitesses du corps pendulaire à une distance minimale et maximale de la position de repos.
- Calcul de la surface balayée par le rayon vecteur du corps pendulaire par intervalle de temps à une distance minimale et maximale par rapport à la position de repos.

**1**
**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre | Appareil   | Référence |
|--------|--|-----------|
| 1      | Ensemble d'appareils permettant un enregistrement selon le marquage à poudre | 1000739   |
| 1      | Pendule avec électrode d'enregistrement                                      | 1000780   |
| 2      | Socle pour statif, trépied, 150 mm   | 1002835   |
| 2      | Tige statif, 1000 mm   | 1002936   |
| 1      | Tige statif, 750 mm  | 1002935   |
| 3      | Noix universelle   | 1002830   |

**GENERALITES**

Une planète en mouvement autour du soleil conserve son moment cinétique, étant donné que la force exercée sur les planètes est toujours orientée vers le centre du mouvement. Il est permis d'en conclure que la trajectoire des planètes se trouve obligatoirement sur un plan fixe. On peut également en déduire la seconde loi de Kepler, également connue comme loi des aires, selon laquelle le rayon vecteur reliant une planète au Soleil balaye des aires égales en des temps égaux.

Le rapport exact entre la force centrale et la distance par rapport au centre de la force n'a pas d'incidence sur la validité de la loi des aires. Celle-ci fixe seulement la forme de l'orbite autour du centre de la force. La loi des aires est ainsi également valable pour les oscillations elliptiques d'un pendule autour de sa position de repos, aussi longtemps que son angle de déviation n'est pas trop important. Le mouvement du corps pendulaire se situe pour ainsi dire sur un plan horizontal (cf. fig. 1) et une force rétroactive s'exerce à chaque point de la trajectoire  $r$

$$(1) \quad F = -\frac{m \cdot g}{d} \cdot r$$

$g$ : Accélération de la chute,  
 $d$ : Longueur du pendule,  
 $m$ : Masse du corps pendulaire

dirigée vers la position de repos du pendule. Cette force ne modifie pas le moment cinétique

$$(2) \quad L = m \cdot r(t) \times \frac{\Delta r(t)}{\Delta t}$$

du corps pendulaire. L'aire balayée par le rayon vecteur  $r(t)$  par intervalle de temps  $\Delta t$

$$(3) \quad \Delta A = \frac{1}{2} |r(t) \times \Delta r(t)| = \frac{1}{2} \cdot r(t) \cdot \Delta r(t) \cdot \sin \alpha$$

est donc constante (cf. fig.2).

Au cours de l'expérience, le mouvement du corps pendulaire est enregistré selon la méthode du marquage à poudre. L'électrode d'écriture du pendule glisse sur une plaque isolée recouverte d'une fine poudre de soufre. Une tension alternant avec la fréquence de la tension alternative du secteur appliquée entre l'électrode d'écriture et la plaque provoque, suivant la polarité, l'attraction ou la répulsion électrostatique de la poudre de soufre. Ce faisant une trace poudreuse constituée de repères de temps est enregistrée, dont la distance spatiale permet de relever directement la vitesse du corps pendulaire.

**EVALUATION**

Dans un premier temps, on détermine sous forme de graphique le centre de la trace enregistrée et les points de la courbe de la trajectoire auxquels la distance par rapport au centre est la plus grande ou la plus petite. On détermine pour ces points de la courbe de trajectoire l'aire balayée par le rayon vecteur en 10 périodes d'oscillations de la tension alternative ; ce faisant, à des fins de simplification, on définit cette surface comme un triangle.

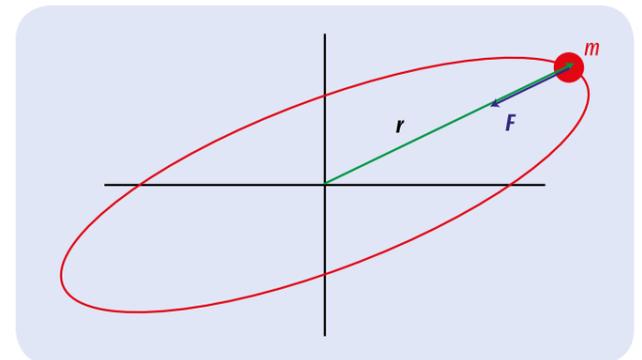


Fig. 1 Oscillation elliptique du corps pendulaire vue d'en haut

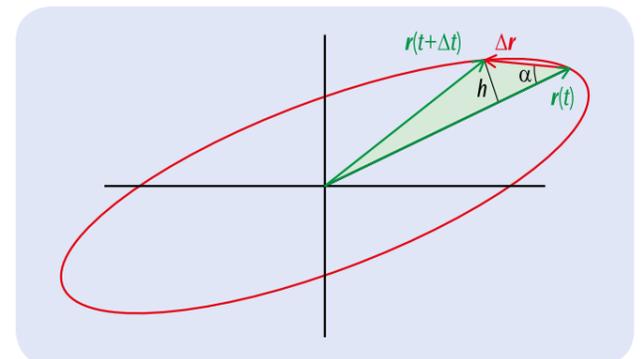
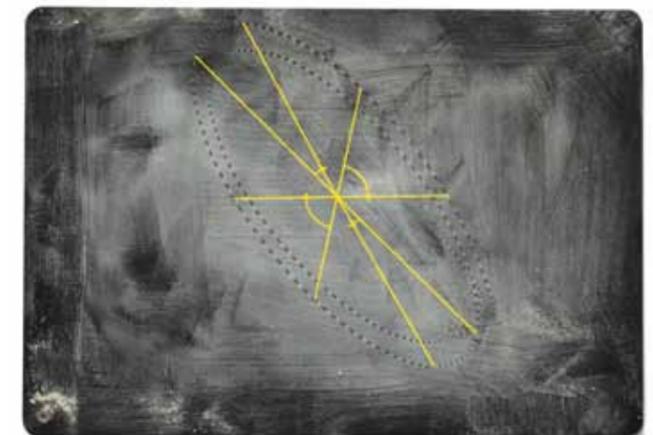

 Fig. 2 Aire balayée par le rayon vecteur du corps pendulaire dans l'intervalle de temps  $\Delta t$ 


Fig. 3 Exemple de mesure avec évaluation

**UE1040101 MOUVEMENTS DE ROTATION A ACCELERATION UNIFORME**

**UE1040101**



**EXERCICES**

- Enregistrement point par point du diagramme d'angle de rotation et de temps d'un mouvement de rotation accéléré uniformément.
- Confirmation de la proportionnalité entre l'angle de rotation et le carré du temps.
- Confirmation de l'accélération angulaire en fonction du couple de rotation d'accélération et confirmation de l'équation du mouvement de Newton.
- Confirmation de l'accélération angulaire en fonction du moment d'inertie et confirmation de l'équation du mouvement de Newton.

**OBJECTIF**

Confirmation de l'équation du mouvement de Newton

**RESUME**

L'angle de rotation  $\varphi$  d'un corps rigide accéléré de manière uniforme et tournant sur un axe fixe augmente proportionnellement au carré du temps  $t$ . Le facteur de proportionnalité permet de calculer l'accélération angulaire  $\alpha$  qui, selon l'équation du mouvement de Newton, dépend du couple de rotation d'accélération et du moment d'inertie du corps rigide.

**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Système de rotation sur coussinet d'air (230 V, 50/60 Hz) | 1000782 ou |
|        | Système de rotation sur coussinet d'air (115 V, 50/60 Hz) | 1000781    |
| 1      | Capteur réflexe laser                                     | 1001034    |
| 1      | Compteur numérique (230 V, 50/60 Hz)                      | 1001033 ou |
|        | Compteur numérique (115 V, 50/60 Hz)                      | 1001032    |
| 1      | Décimètre à ruban de poche, 2 m                           | 1002603    |

**GENERALITES**

La rotation d'un corps rigide sur un axe fixe peut être décrite par analogie aux mouvements de translation unidimensionnels. On remplace le parcours  $s$  par l'angle de rotation  $\varphi$ , la vitesse  $v$  par la vitesse angulaire, l'accélération  $a$  par l'accélération angulaire, la force d'accélération  $F$  par le couple de rotation  $M$  appliqué au corps rigide et la masse inerte  $m$  par le moment d'inertie  $J$  du corps rigide sur l'axe de rotation.



Par analogie à l'équation de Newton sur les mouvements de translation, un corps rigide placé sur un pivot rotatif de moment d'inertie  $J$  subit l'accélération angulaire  $\alpha$  si le couple de rotation est

$$(1) \quad M = J \cdot \alpha$$

Si le couple de rotation est constant, le corps effectue un mouvement de rotation à une accélération angulaire constante.

Au cours de l'expérience, ce phénomène est étudié sur un système de rotation à très faibles frottements. Au moment  $t_0 = 0$ , la vitesse angulaire  $\omega = 0$  le système est lancé et tourne pendant le temps  $t$  dans un angle

$$(2) \quad \varphi = \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot t^2$$

Le couple de rotation  $M$  résulte de la force du poids d'une masse d'accélération  $m_M$ , qui s'applique au corps dans un écart  $r_M$  avec l'axe de rotation.

$$(3) \quad M = r_M \cdot m_M \cdot g$$

$$g = 9,81 \frac{m}{s^2} : \text{Accélération de la pesanteur}$$

Si l'on ajoute à la barre porte-poids du système de rotation deux masses supplémentaires  $m_j$  dans un écart fixe  $r_j$  avec l'axe de rotation, le moment d'inertie augmente selon l'équation

$$(4) \quad J = J_0 + 2 \cdot m_j \cdot r_j^2$$

$$J_0 : \text{Moment d'inertie sans masses supplémentaires}$$

Plusieurs masses sont disponibles tant pour l'accélération que pour l'augmentation de l'inertie. En outre, les écarts  $r_M$  et  $r_j$  peuvent être variés. Ainsi l'accélération angulaire peut-elle être étudiée pour confirmer la formule (1) en fonction du moment d'inertie et du couple de rotation.

**EVALUATION**

La proportionnalité de l'angle de rotation au carré du temps est illustrée par la mesure des temps correspondant aux angles de rotation  $10^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $160^\circ$  et  $250^\circ$ .

Pour la mesure de l'accélération angulaire  $\alpha$  en fonction des paramètres  $M$  et  $J$ , on mesure le temps  $t(90^\circ)$  nécessaire pour une rotation de  $90^\circ$ . Dans ce cas :

$$\alpha = \frac{\pi}{t(90^\circ)^2}$$

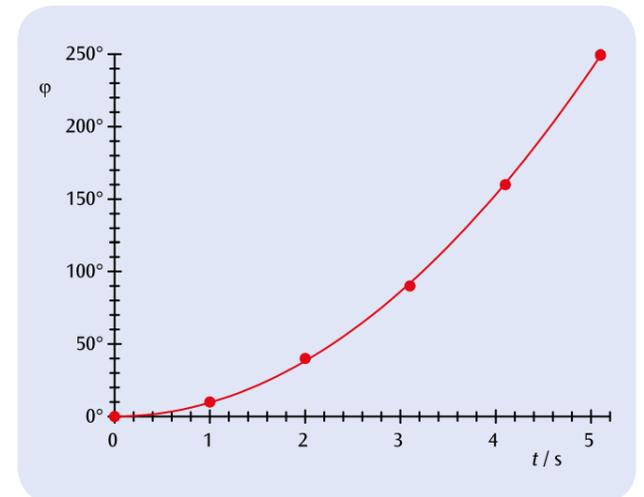


Fig. 1 Diagramme angle de rotation-temps d'un mouvement de rotation accéléré uniformément

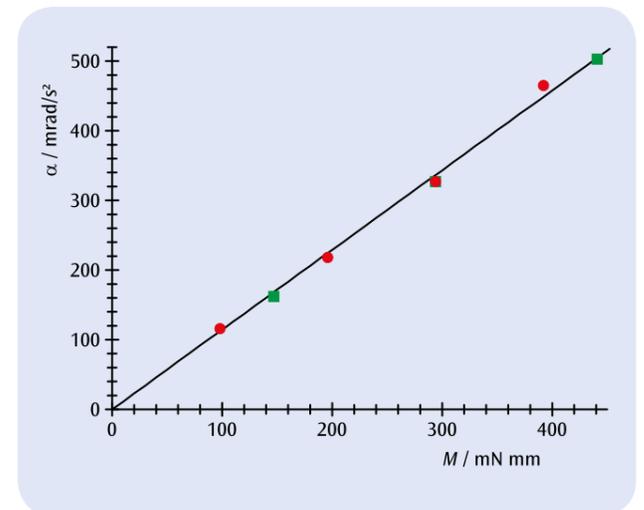


Fig. 2 Accélération angulaire  $\alpha$  en fonction du couple de rotation  $M$

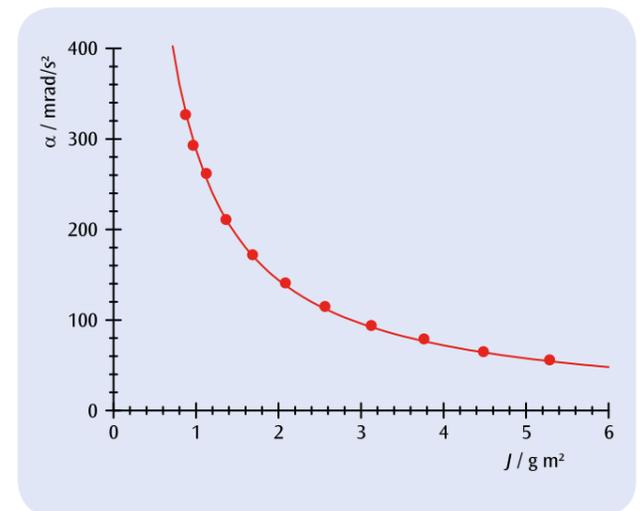


Fig. 3 Accélération angulaire  $\alpha$  en fonction du moment d'inertie  $J$



## EXERCICES

- Détermination de la grandeur de référence angulaire  $D_r$  du ressort d'accouplement.
- Détermination du moment d'inertie  $J$  en fonction de la distance  $r$  des masses par rapport à l'axe de rotation.
- Détermination du moment d'inertie  $J$  en fonction de la masse  $m$  des masselottes.

## OBJECTIF

Confirmation du moment d'inertie d'une barre à paramètres variables

## RESUME

Le moment d'inertie d'un corps par rapport à son axe de rotation dépend de la répartition des masses dans le corps par rapport à l'axe. Ce phénomène est étudié pour une barre sur laquelle sont fixés deux masselottes disposées symétriquement par rapport à l'axe de rotation. La durée d'oscillation de la barre reliée à un ressort d'accouplement est d'autant plus longue que son moment d'inertie déterminé par les masses supplémentaires et leurs distances sont importants.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Système de rotation sur coussinet d'air (230 V, 50/60 Hz) | 1000782 ou |
|        | Système de rotation sur coussinet d'air (115 V, 50/60 Hz) | 1000781    |
| 1      | Complément au système de rotation sur coussinet d'air     | 1000783    |
| 1      | Capteur réflexe laser                                     | 1001034    |
| 1      | Compteur numérique (230 V, 50/60 Hz)                      | 1001033 ou |
| 1      | Compteur numérique (115 V, 50/60 Hz)                      | 1001032    |

1

## GENERALITES

L'inertie d'un corps rigide par rapport à une modification de son mouvement de rotation sur un axe fixe est exprimée par le moment d'inertie  $J$ . Elle dépend de la répartition des masses dans le corps par rapport à l'axe de rotation et est d'autant plus grande que les distances à l'axe de rotation sont importants.

Ce phénomène est étudié dans une expérience avec une poulie tournante dotée d'une barre portepoids sur laquelle sont fixés à une distance  $r$  symétriquement par rapport à l'axe de rotation deux poids de masse  $m$ . Dans ce cas, le moment d'inertie s'élève à

$$(1) \quad J = J_0 + 2 \cdot m \cdot r^2$$

$J_0$ : Moment d'inertie sans les masses

Si la poulie tournante est reliée de façon élastique à un support au moyen d'un ressort cylindrique, le moment d'inertie peut être déterminé à partir de la durée d'oscillation de la poulie autour de sa position repos. On a l'équation suivante :

$$(2) \quad T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J}{D_r}}$$

$D_r$ : Grandeur de référence angulaire du ressort cylindrique

En d'autres termes, la durée d'oscillation  $T$  est d'autant plus longue que le moment d'inertie  $J$  de la poulie tournante à barre portepoids déterminé par la masse  $m$  et l'écart  $r$  est important.

## EVALUATION

L'équation (2) permet de déduire l'équation pour le moment d'inertie :

$$J = D_r \cdot \frac{T^2}{4\pi^2}$$

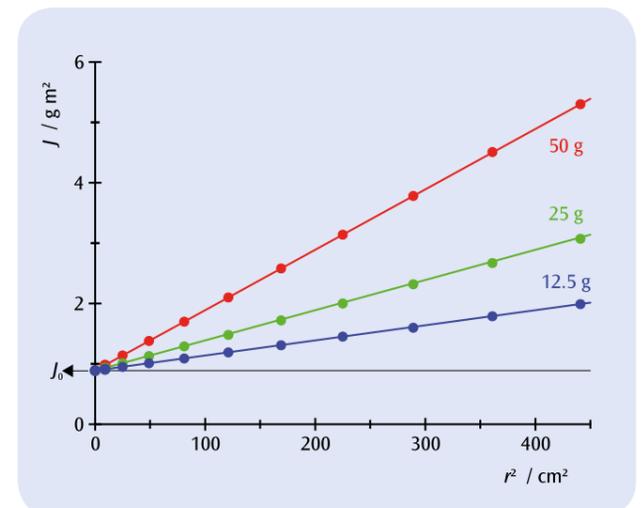


Fig. 1 Moment d'inertie  $J$  de la poulie tournante à barre portepoids pour trois masses supplémentaires différentes  $m$  en fonction du carré de l'écart  $r$  par rapport à l'axe de rotation



## EXERCICES

- Déterminer la référence angulaire  $D_r$  des champs de couplage.
- Déterminer le moment d'inertie  $J$  de la barre porte-poids sans masse.
- Déterminer le moment d'inertie  $J$  en fonction de l'écart  $r$  des masses par rapport à l'axe de rotation.
- Déterminer le moment d'inertie  $J$  pour un disque circulaire et un disque en bois, une bille en bois ainsi qu'un cylindre plein et un cylindre creux.

## OBJECTIF

Déterminer le moment d'inertie de différents corps

## RESUME

Le moment d'inertie d'un corps sur son axe de rotation dépend de la répartition de la masse dans le corps par rapport à l'axe. L'étude porte sur une barre porte-poids sur laquelle sont disposées deux masses symétriques par rapport à l'axe de rotation, pour un disque circulaire et un disque en bois, une bille en bois, un cylindre plein et un cylindre creux. La durée d'oscillation des corps dépend de la répartition de la masse et de leur rayon.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                                      | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Axe de torsion                                | 1008662    |
| 1      | Barrière photoélectrique                      | 1000563    |
| 1      | Compteur numérique (230 V, 50/60 Hz)          | 1001033 ou |
|        | Compteur numérique (115 V, 50/60 Hz)          | 1001032    |
| 1      | Socle de serrage, 1000 g                      | 1002834    |
| 1      | Socle pour statif, trépied, 185 mm            | 1002836    |
| 1      | Dynamomètre de précision, 1 N                 | 1003104    |
| 1      | Corps géométriques adaptés à l'axe de torsion | 1008663    |

# 1

## GENERALITES

L'inertie d'un corps rigide par rapport à une modification du mouvement de rotation sur un axe fixe est exprimée par le moment d'inertie  $J$ . Dépendant de la répartition de la masse dans le corps par rapport à son axe de rotation, il est d'autant plus grand que les écarts par rapport à celui-ci sont importants.

D'une manière générale, le moment d'inertie est défini par le biais de l'intégrale de volume :

$$(1) \quad J = \int_V r_s^2 \cdot \rho(r) \cdot dV$$

$r_s$  : part de  $r$  perpendiculaire à l'axe de rotation  
 $\rho(r)$  : répartition de la masse du corps

Dans l'exemple d'une barre porte-poids, sur laquelle sont disposées symétriquement deux masses  $m$  dans un écart  $r$  avec l'axe de rotation, le moment d'inertie est le suivant :

$$(2) \quad J = J_0 + 2 \cdot m \cdot r^2$$

$J_0$  : moment d'inertie de la barre porte-poids sans masses

À présent, on peut fixer les différents corps sur l'axe de torsion. Pour la durée d'oscillation  $T$  d'une période :

$$(3) \quad T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J}{D_r}}$$

$D_r$  : référence angulaire du ressort hélicoïdal

C'est-à-dire que la durée d'oscillation  $T$  est d'autant plus grande que le moment d'inertie  $J$  est important.

La référence angulaire du ressort hélicoïdal peut être déterminée à l'aide d'une balance dynamométrique :

$$(4) \quad D_r = \frac{F \cdot r}{\alpha}$$

$\alpha$  : déviation de la position d'équilibre

## EVALUATION

À partir de (3), on obtient l'équation permettant de déterminer le moment d'inertie :

$$J = D_r \cdot \frac{T^2}{4\pi^2}$$

Pour le montage avec la barre porte-poids, il faut encore soustraire le moment d'inertie de la barre :  $J(\text{masses}) = J(\text{barre} + \text{masses}) - J(\text{barre})$

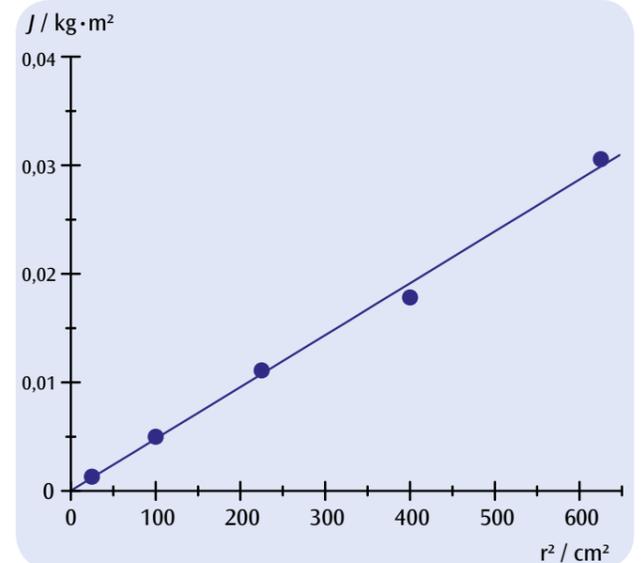


Fig. 1 Le moment d'inertie  $J$  des masses dépend du carré de l'écart des masses  $r$



## EXERCICES

- Confirmer la proportionnalité entre la fréquence de rotation  $f_R$  du disque tournant et le temps  $T_p$  d'une précession du gyroscope et déterminer le moment d'inertie à partir de la représentation graphique  $f_R(T_p)$ .
- Confirmer la proportionnalité entre la fréquence de rotation  $f_R$  et la fréquence de nutation  $f_N$  par la représentation graphique  $f_N(f_R)$  et les temps correspondants  $T_R(T_N)$ .

## OBJECTIF

Étudier par l'expérience la précession et la nutation d'un gyroscope et déterminer le moment d'inertie

## RESUME

En plus de son mouvement de rotation, une toupie effectue un mouvement de précession et de nutation, selon qu'une force extérieure et ainsi un couple supplémentaire agissent sur un axe de rotation ou que l'axe de rotation de la toupie tournant calmement est dévié de sa position d'équilibre. La période de précession est inversement proportionnelle à la période de rotation et la période de nutation directement proportionnelle à la période de rotation. Le rapport entre les périodes de précession et de rotation permet de déterminer le moment d'inertie du disque tournant.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                           | Référence  |
|--------|------------------------------------|------------|
| 1      | Gyroscope                          | 1000695    |
| 2      | Barrière photoélectrique           | 1000563    |
| 1      | Diode laser rouge de précision     | 1003201    |
| 1      | 3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)       | 1000540 ou |
|        | 3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)       | 1000539    |
| 1      | 3B NETlab™                         | 1000544    |
| 3      | Socle pour statif, trépied, 150 mm | 1002835    |
| 3      | Noix universelle                   | 1002830    |
| 3      | Tige statif, 750 mm                | 1002935    |

## GENERALITES

La toupie est un corps rigide qui tourne sur un axe en un point fixe. Si une force extérieure agit sur l'axe, le couple de rotation modifie l'impulsion de rotation. La toupie tourne alors dans le sens perpendiculaire à l'axe de la figure et à la force agissante. Ce mouvement est appelé précession. Si l'on touche une toupie tournant calmement, elle effectue des mouvements de bascule-

2

ment, appelés la nutation. Les deux mouvements se superposent généralement.

Au cours de l'expérience, on utilise un gyroscope dont le grand disque circulaire tourne avec peu de frottements autour d'un axe de rotation situé sur un point d'appui. Un contrepoids est ajusté de manière à ce que le point d'appui coïncide au centre de gravité. Si le gyroscope est en équilibre et que le disque tournant est mis en rotation, on observe une impulsion de rotation constante  $L$  :

$$(1) \quad L = I \cdot \omega_R$$

$I$  : moment d'inertie,  $\omega_R$  : vitesse angulaire

Le moment d'inertie du disque tournant du gyroscope est donné par :

$$(2) \quad I = \frac{1}{2} M \cdot R^2$$

$M$  : masse du disque,  $R$  : rayon du disque

Si l'axe de rotation est alourdi par une masse supplémentaire  $m$ , le couple de rotation  $\tau$  provoqué par la force due au poids supplémentaire modifie l'impulsion de rotation :

$$(3) \quad \tau = m \cdot g \cdot r = \frac{dL}{dt}$$

$r$  : écart entre le point d'appui de l'axe de rotation et le point d'attaque de la masse supplémentaire

L'axe de rotation se déplace alors selon la Fig. 2 d'un angle

$$(4) \quad d\varphi = \frac{dL}{L} = \frac{m \cdot g \cdot r \cdot dt}{L}$$

et se trouve en précession. Il en résulte pour la vitesse angulaire du mouvement de précession :

$$(5) \quad \omega_p = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{m \cdot g \cdot r}{L} = \frac{m \cdot g \cdot r}{I \cdot \omega_R}$$

et avec  $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$  :

$$(6) \quad \frac{1}{T_p} = f_p = \frac{m \cdot g \cdot r}{I} \cdot T_R$$

Si le disque tournant est mis en rotation sans subir de couple de rotation extérieur supplémentaire et que l'axe de rotation est dévié légèrement, le gyroscope effectue des mouvements de nutation. La vitesse angulaire de la nutation est directement proportionnelle à celle de la rotation :

$$(7) \quad \omega_N = C \cdot \omega_R \quad \text{et} \quad T_R = C \cdot T_N$$

$C$  : constante

Au cours de l'expérience, nous allons saisir les mouvements de rotation, de précession et de nutation avec des barrières lumineuses et enregistrer puis représenter les courbes temporelles des impulsions à l'aide de 3B NETlog™ et 3B NETlab™.

## EVALUATION

Les périodes de rotation, de précession et de nutation sont déterminées par les courbestemporelles des impulsions enregistrées. Selon l'équation (6), la période de précession est inversement proportionnelle à la période de rotation et, selon l'équation (7), la période de nutation directement proportionnelle à la période de rotation. Dans le cadre de la précision de mesure, les valeurs de mesure se situent donc sur une droite passant par l'origine dans les diagrammes correspondants. À partir de la pente d'une droite adaptée aux points de mesure  $f_R(T_p)$ , on peut déterminer par l'expérience le moment d'inertie du disque tournant du gyroscope et le comparer à celui qui a été calculé au moyen de l'équation (2).

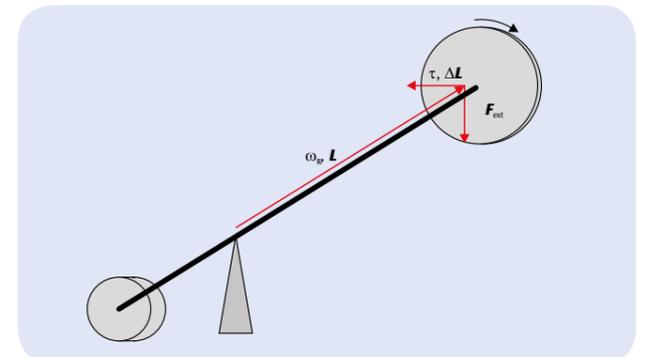


Fig. 1 Représentation schématique du gyroscope pour la précession

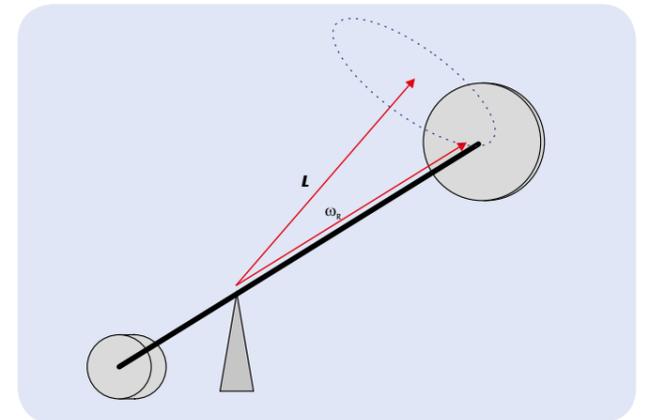
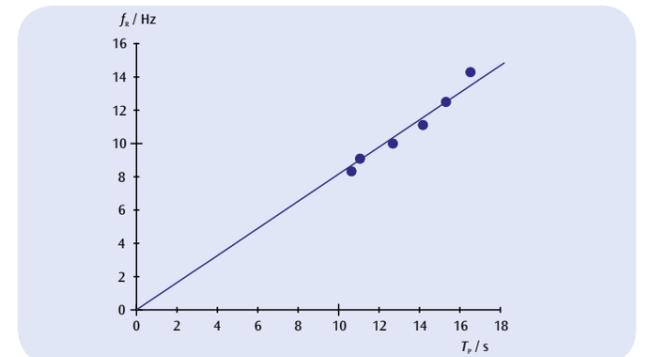
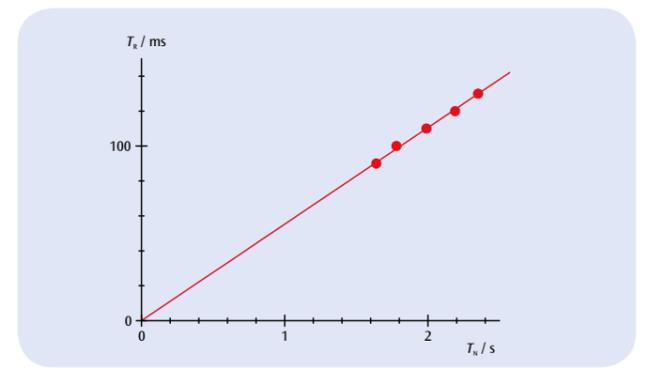


Fig. 2 Représentation schématique du gyroscope pour la nutation


 Fig. 3 Fréquence de rotation  $f_R$  du disque tournant en fonction du temps de précession  $T_p$ 

 Fig. 4 Temps de rotation  $T_R$  en fonction du temps de nutation  $T_n$


**OBJECTIF**

Mesure de la période d'oscillation d'un pendule simple pour différentes masses suspendues

**EXERCICES**

- Mesure de la période d'oscillation  $T$  d'un pendule pesant simple en fonction de la longueur du pendule  $L$ .
- Mesure de la période d'oscillation  $T$  d'un pendule pesant simple en fonction de la masse suspendue  $m$ .
- Détermination de l'accélération de la pesanteur  $g$ .

**RESUME**

La période d'oscillation  $T$  d'un pendule pesant simple dépend de la longueur du pendule  $L$ , mais non de la masse suspendue  $m$ . Ceci est confirmé par une série de mesures au cours desquelles la période d'oscillation du pendule simple est mesurée au moyen d'une barrière photoélectrique connectée à un compteur numérique.

**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre | Appareil                             | Référence  |
|--------|--------------------------------------|------------|
| 1      | Jeu de 4 billes pendulaires          | 1003230    |
| 1      | Ficelle d'expérimentation            | 1001055    |
| 1      | Socle pour statif, trépied, 185 mm   | 1002836    |
| 1      | Tige statif, 1500 mm                 | 1002937    |
| 1      | Tige statif, 100 mm                  | 1002932    |
| 1      | Noix de serrage avec crochet         | 1002828    |
| 2      | Noix universelle                     | 1002830    |
| 1      | Barrière photoélectrique             | 1000563    |
| 1      | Compteur numérique (230 V, 50/60 Hz) | 1001033 ou |
|        | Compteur numérique (115 V, 50/60 Hz) | 1001032    |
| 1      | Double mètre à ruban de poche        | 1002603    |
| 1      | Balance électronique 200 g           | 1003433    |

**1**
**GENERALITES**

Un pendule pesant simple de masse  $m$  et d'une longueur de fil  $L$  oscille en régime de petites oscillations près de sa position de repos tant que la déviation angulaire n'est pas trop grande. La période d'oscillation  $T$ , c.-à-d. la durée nécessaire à deux passages consécutifs du pendule par le point d'équilibre, dépend de la longueur du fil  $L$ , mais pas de la masse  $m$ .

Lorsque le pendule s'écarte de la position d'équilibre selon un angle, l'expression de la force de rappel s'écrit

$$(1a) \quad F_1 = -m \cdot g \cdot \sin \varphi$$

ou avec une valeur approchée pour de petits angles

$$(1b) \quad F_1 = -m \cdot g \cdot \varphi$$

La force d'inertie de la masse accélérée s'exprime par

$$(2) \quad F_2 = m \cdot L \cdot \ddot{\varphi}$$

Ces deux forces étant égales, on a l'équation de mouvement de l'oscillateur harmonique :

$$(3) \quad \ddot{\varphi} + \frac{g}{L} \cdot \varphi = 0$$

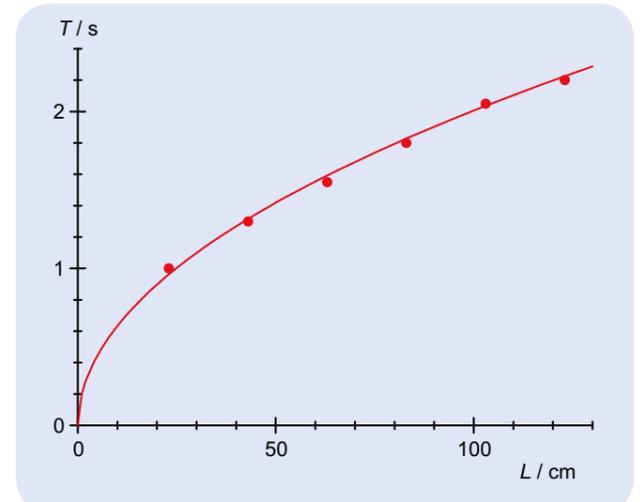
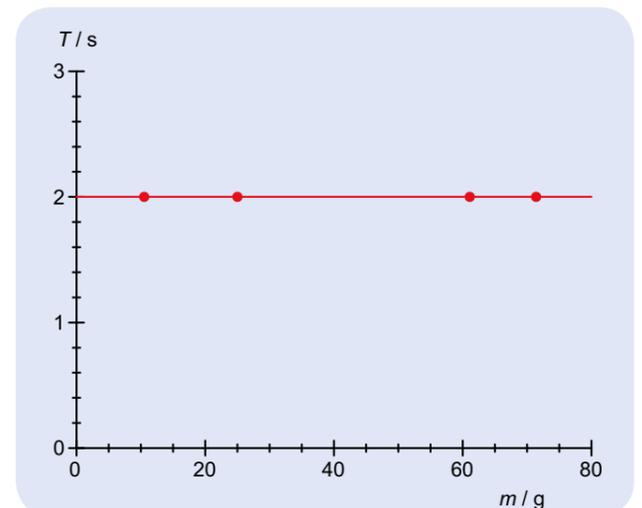
et la période des oscillations  $T$  s'écrit :

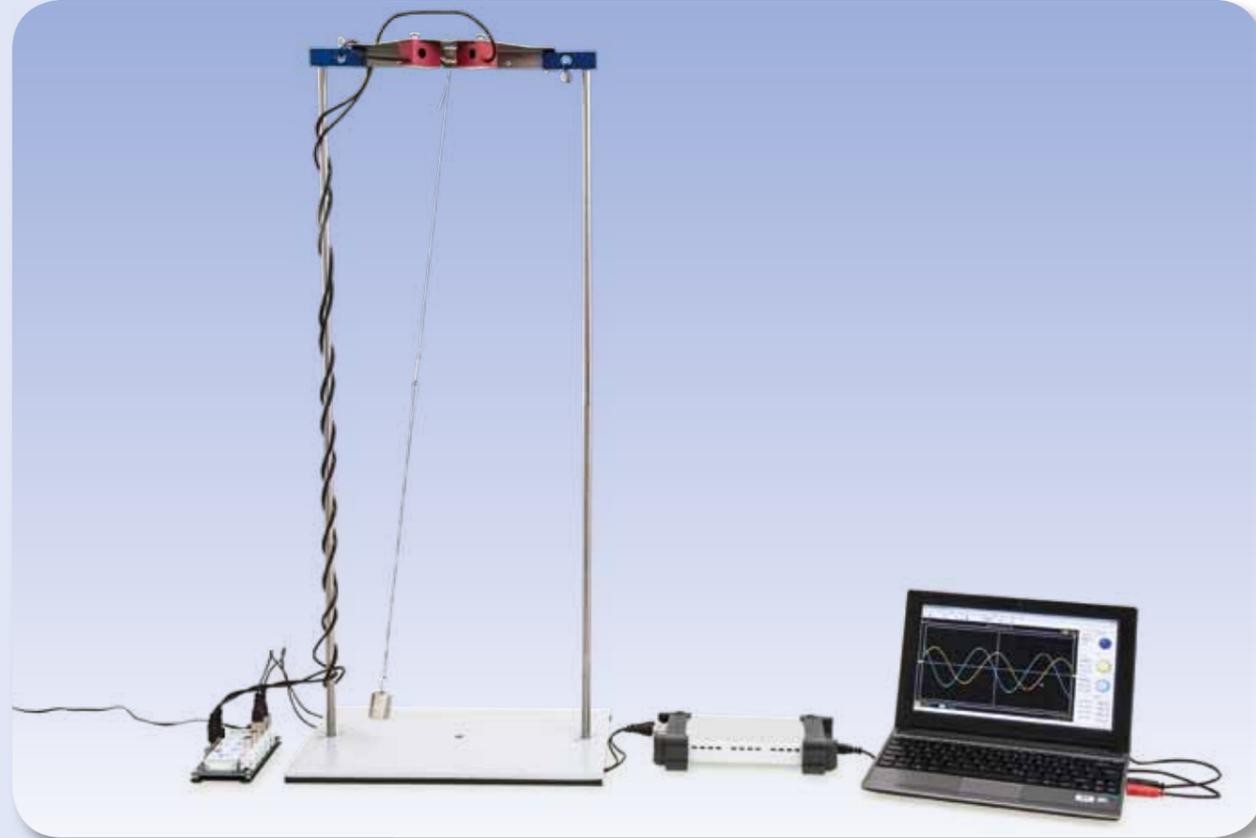
$$(4) \quad T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Dans l'expérience, la période d'oscillation pour différentes longueurs de pendules et différentes masses est mesurée au moyen d'une barrière photoélectrique connectée à un compteur numérique. Le compteur numérique est programmé de manière à effectuer chaque mesure à la fin d'une période d'oscillation complète (c.-à-d. deux passages par le point d'équilibre).

**EVALUATION**

Les valeurs mesurées sont reportées sous forme de points dans un diagramme  $T-L$  d'une part et dans un diagramme  $T-m$  d'autre part. Les diagrammes confirment le fait que la période d'oscillation dépend de la longueur du fil, mais pas de la masse suspendue.


 Fig. 2 Période d'oscillation  $T$  en fonction de la longueur du pendule  $L$ 

 Fig. 3 Période d'oscillation  $T$  en fonction de la masse du pendule  $m$


**EXERCICES**

- Enregistrement du mouvement oscillatoire elliptique d'un pendule pesant simple en deux composants perpendiculaires l'un à l'autre pour différentes conditions initiales.

**OBJECTIF**

Description du mouvement oscillatoire elliptique d'un pendule pesant simple comme recouvrement de deux composants perpendiculaires l'un à l'autre

**RESUME**

En fonction des conditions initiales, un pendule pesant simple correctement accroché oscille en régime des petites oscillations de telle manière que le corps du pendule décrit une ellipse pendant le mouvement. Si l'on décompose ce mouvement en deux composants perpendiculaires l'un à l'autre, on crée un déphasage entre les deux. Dans l'expérience, ce phénomène est représenté en mesurant les oscillations au moyen de deux capteurs de force dynamiques perpendiculaires l'un à l'autre. Les résultats analysés sont l'amplitude des composants et leur déphasage.

**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre | Appareil                                  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Pendule à fil SW                          | 1012854    |
| 1      | Matériel de support SW                    | 1012849    |
| 1      | Commande de capteurs SW (115 V, 50/60 Hz) | 1012850 ou |
|        | Commande de capteurs SW (230 V, 50/60 Hz) | 1012851    |
| 1      | Oscilloscope USB 2x50 MHz                 | 1017264    |

**1**
**GENERALITES**

En fonction des conditions initiales, un pendule pesant simple correctement accroché oscille en régime des petites oscillations de telle manière que le corps du pendule décrit une ellipse pendant le mouvement. Si l'on décompose ce mouvement en deux composants perpendiculaires l'un à l'autre, on crée un déphasage entre les deux.

Dans l'expérience, ce phénomène est représenté par la mesure des oscillations au moyen de deux capteurs de force dynamiques perpendiculaires l'un à l'autre. Le déphasage est visible immédiatement sur la représentation graphique des oscillations grâce à un oscilloscope à deux canaux. Trois cas spécifiques sont alors mis en évidence :

- Si le pendule oscille sur la ligne bissectrice entre les deux capteurs de force, le déphasage est  $\varphi = 0^\circ$ .
- Pour les trajectoires perpendiculaires à la ligne bissectrice, le déphasage est  $\varphi = 180^\circ$ .
- Si le corps du pendule décrit une ellipse, le déphasage est  $\varphi = 90^\circ$ .

**EVALUATION**

Les oscillations sont enregistrées et gelées dans un oscilloscope à mémoire. Les résultats analysés sont l'amplitude des composants et leur déphasage.

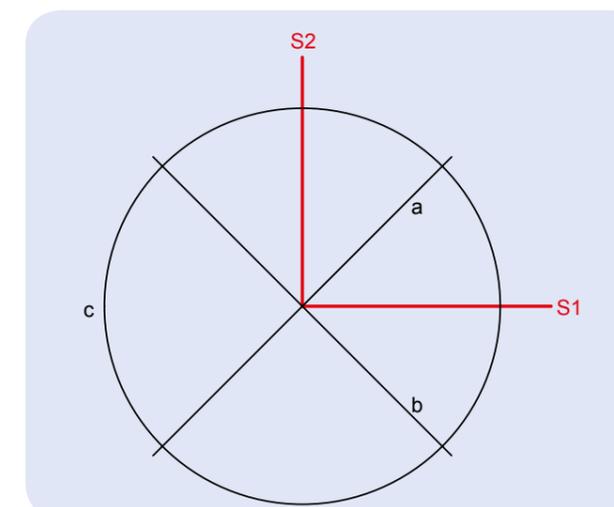


Fig. 1 Ajustage des capteurs S1 et S2 et sens d'oscillation étudiés du pendule à fil.

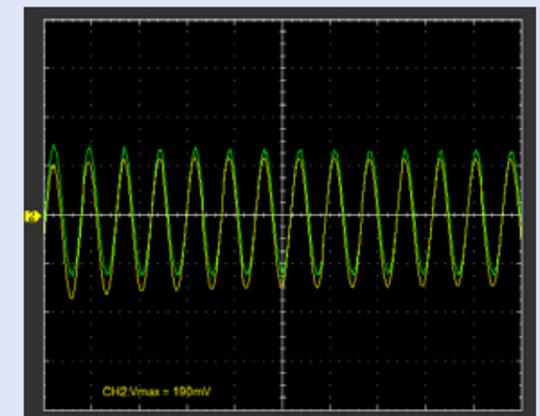


Fig. 2 Les composants oscillants du pendule pesant simple lors d'un mouvement oscillatoire « sur la ligne bissectrice »

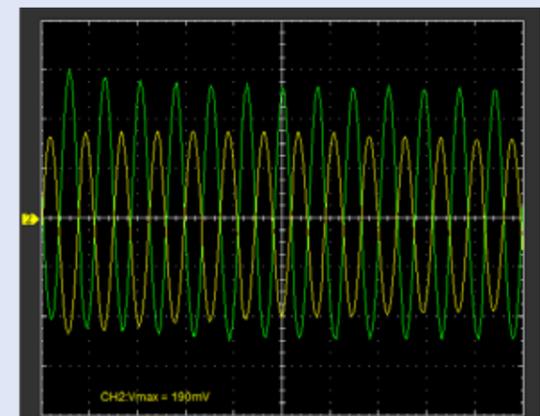


Fig. 3 Composants oscillants du pendule pesant simple lors d'un mouvement oscillatoire « perpendiculaire à la ligne bissectrice »

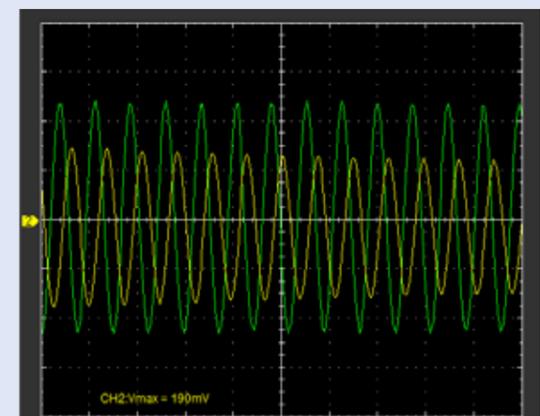


Fig. 4 Composants oscillants du pendule pesant simple lors d'un mouvement oscillatoire elliptique



## EXERCICES

- Mesure de la période d'oscillation  $T$  en fonction de la composante efficace  $g_{\text{eff}}$  de l'accélération de la pesanteur.
- Mesure de la période d'oscillation  $T$  à différentes longueurs de pendule  $L$ .

## OBJECTIF

Mesure de la période d'oscillation d'un pendule en fonction de la composante efficace de l'accélération de la pesanteur

## RESUME

La période d'oscillation d'un pendule est augmentée par l'inclinaison de son axe de rotation, car la composante efficace de l'accélération de la pesanteur est alors réduite.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil   | Référence  |
|--------|--|------------|
| 1      | Pendule g variable                               | 1000755    |
| 1      | Support de barrière photoélectrique pour pendule | 1000756    |
| 1      | Barrière photoélectrique                         | 1000563    |
| 1      | Compteur numérique (230 V, 50/60 Hz)             | 1001033 ou |
|        | Compteur numérique (115 V, 50/60 Hz)             | 1001032    |
| 1      | Socle pour statif, trépied, 150 mm               | 1002835    |
| 1      | Tige statif, 470 mm                              | 1002934    |

# 2

## GENERALITES

La période d'oscillation d'un pendule mathématique est déterminée par la longueur du pendule  $L$  et l'accélération de la pesanteur  $g$ . On peut démontrer l'influence de l'accélération de la pesanteur en inclinant l'axe de rotation autour duquel oscille le pendule.

Lorsque l'axe de rotation est incliné, la composante  $g_{\text{par}}$  qui est parallèle à l'axe de rotation, de l'accélération de la pesanteur  $g$  est compensée par le support de l'axe de rotation (cf. Fig.1). La composante efficace restante  $g_{\text{eff}}$  s'élève à :

$$(1) \quad g_{\text{eff}} = g \cdot \cos \alpha$$

$\alpha$ : Angle d'inclinaison de l'axe de rotation par rapport à la verticale

Après la déviation du pendule d'un angle  $\varphi$  de sa position au repos, il s'exerce sur la masse accrochée  $m$  une force de rappel

$$(2) \quad F = -m \cdot g_{\text{eff}} \cdot \sin \varphi$$

Aussi, pour de petites déviations, l'équation du mouvement pendulaire est la suivante :

$$(3) \quad m \cdot L \cdot \ddot{\varphi} + m \cdot g_{\text{eff}} \cdot \varphi = 0$$

Le pendule oscille ainsi à la fréquence angulaire suivante :

$$(4) \quad \omega = \sqrt{\frac{g_{\text{eff}}}{L}}$$

## EVALUATION

L'équation (4) permet de déterminer la période d'oscillation du pendule

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g_{\text{eff}}}}$$

La période d'oscillation est donc plus courte lorsque le pendule est raccourci et plus longue lorsque la composante efficace de l'accélération de la pesanteur est réduite.

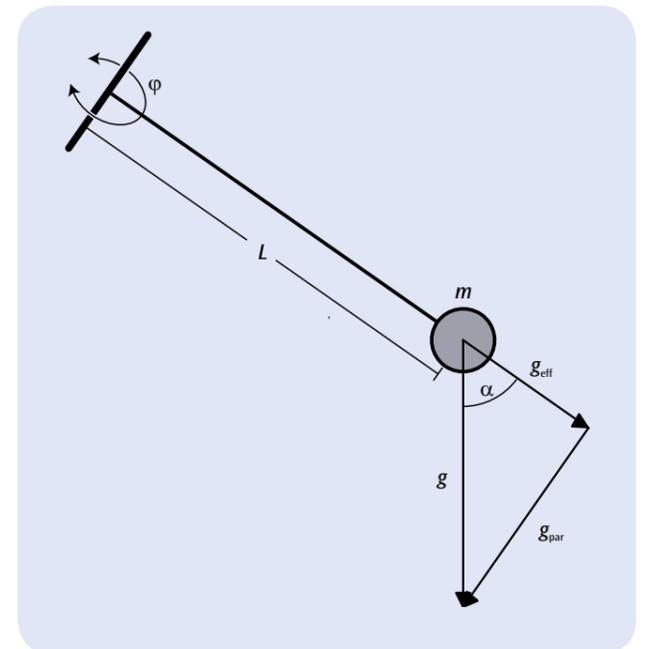


Fig. 1 Pendule gravitationnel variable (représentation schématique)

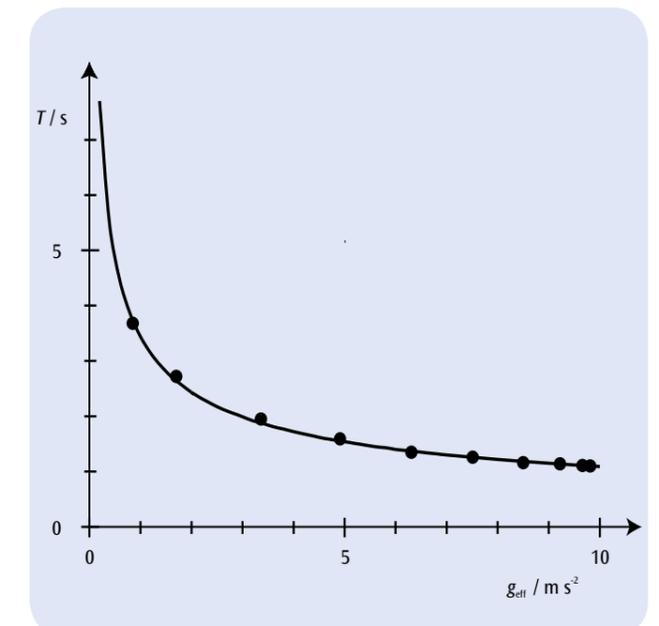


Fig. 2 Période d'oscillation d'un pendule en fonction de la composante efficace de l'accélération de la pesanteur  
Tracé obtenu pour  $L = 30 \text{ cm}$

## EXERCICES

- Mesurer le sens de l'oscillation en fonction du temps.
- Déterminer la vitesse de rotation.
- Déterminer la latitude géographique.

## OBJECTIF

Démontrer la rotation de la Terre avec un pendule de Foucault

## RESUME

Un pendule de Foucault est un long pendule à fil dont la grande masse permet de démontrer la rotation de la Terre. Dans l'expérience, on utilise un pendule de 1,2 m dont le sens d'oscillation peut être déterminé avec une grande précision au moyen d'une projection d'ombre. Si l'observation dure un peu plus longtemps, on peut compenser l'atténuation par une excitation électromagnétique à réglage continu.



## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                              | Référence  |
|--------|---------------------------------------|------------|
| 1      | Pendule de Foucault (230 V, 50/60 Hz) | 1000748 ou |
|        | Pendule de Foucault (115 V, 50/60 Hz) | 1000747    |
| 1      | Chronomètre numérique                 | 1002811    |

2

## GENERALITES

Un pendule de Foucault est un long pendule à fil dont la grande masse permet de démontrer la rotation de la Terre. Il remonte à Jean Foucault qui, en 1851, découvrit en utilisant un pendule de deux mètres de long que le sens de l'oscillation se modifiait au fil du temps. Plus tard, l'expérience fut reproduite avec des pendules toujours plus longs et plus lourds.

Comme la Terre tourne sur son axe, une force de Coriolis est exercée par rapport au système de coordonnées terrestre du pendule oscillant :

$$(1) \quad F = 2 \cdot m \cdot \Omega_0 \times v$$

$m$  : masse du corps du pendule  
 $\Omega_0$  : vecteur de la vitesse angulaire de la Terre  
 $v$  : vecteur de vitesse du pendule oscillant

dans le sens transversal au sens de l'oscillation. Elle entraîne une rotation du plan d'oscillation à une fréquence angulaire qui dépend de la latitude géographique  $\varphi$  du point de suspension.

Comme le pendule de Foucault n'est dévié que dans de petits angles  $\alpha$ , le corps du pendule tourne uniquement sur le plan horizontal défini dans la Fig. 1 par l'axe N tourné vers le Nord et l'axe E orienté vers l'Est. Seules sont considérées les déviations à l'horizontale, car le corps du pendule est suspendu à un fil. C'est pourquoi seule la composante verticale

(2)  $\Omega(\varphi) = \Omega_0 \cdot \sin\varphi$   
 du vecteur  $\Omega_0$  est déterminante. Aussi l'équation de mouvement du pendule de Foucault oscillant est-elle la suivante :

$$(3) \quad \frac{d^2\alpha}{dt^2} e_p + 2 \cdot \Omega_0 \cdot \sin\varphi \cdot \frac{d\alpha}{dt} e_v + \frac{g}{L} \cdot \alpha \cdot e_p = 0$$

$L$  : longueur du pendule,  $g$  : accélération de la pesanteur  
 $e_p$  : vecteur unitaire horizontal parallèle au sens actuel de l'oscillation  
 $e_v$  : vecteur unitaire horizontal perpendiculaire au sens actuel de l'oscillation

Sa résolution peut être divisée en résolution pour l'angle de déviation  $\alpha$  et en résolution pour le vecteur unitaire  $e_p$  tournant parallèlement au sens actuel de l'oscillation :

$$(4a) \quad \alpha(t) = \cos(\omega \cdot t + \beta) \quad \text{avec} \quad \omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

$$(4b) \quad e_p(t) = e_E \cdot \cos(\psi(t)) + e_N \cdot \sin(\psi(t))$$

avec  $\psi(t) = \Omega_0 \cdot \sin\varphi \cdot t + \psi_0$  : sens de l'oscillation  
 $e_E$  : vecteur unitaire horizontal vers l'Est  
 $e_N$  : vecteur unitaire horizontal vers le Nord

Au fil du temps, le plan d'oscillation tourne donc à la fréquence indiquée dans l'équation (2). Sur l'hémisphère Nord, la rotation est à droite et sur l'hémisphère Sud, elle est à gauche. La vitesse de rotation aux pôles est maximale, tandis qu'à l'Équateur, il n'y a pas de déviation.

L'expérience utilise un pendule à fil de 1,2 m de long. Pour éviter des oscillations elliptiques, le fil du pendule heurte à chaque déviation un anneau de Charon. On peut lire avec une grande précision le sens de l'oscillation sur une graduation angulaire grâce à la projection d'ombre du fil. Après

quelques minutes déjà, on peut observer la rotation du plan d'oscillation. Si l'observation dure un peu plus longtemps, on peut compenser l'atténuation par une excitation électromagnétique à réglage continu.

## EVALUATION

L'angle d'orientation  $\psi$  du plan d'oscillation dépend linéairement du temps (voir Fig. 2). La pente des droites passant par les points de mesure donne la valeur recherchée  $\Omega(\varphi)$ . On calcule la latitude géographique en degrés en transformant l'équation (2) en conséquence.

$$\varphi = \frac{180^\circ}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{86400 \text{ s}}{360 \text{ grd}} \cdot \Omega(\varphi)\right)$$

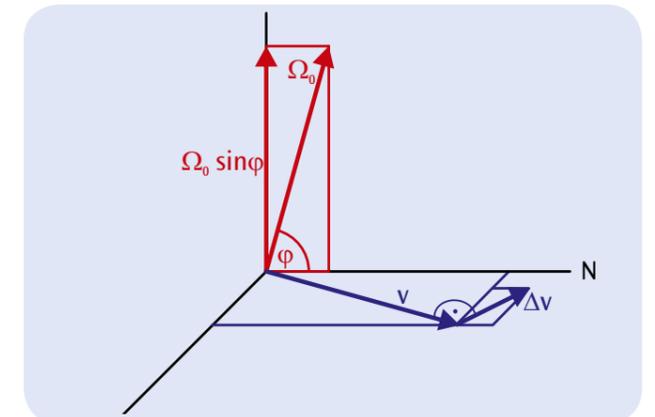


Fig. 1 Représentation dans le système de coordonnées terrestres du pendule de Foucault

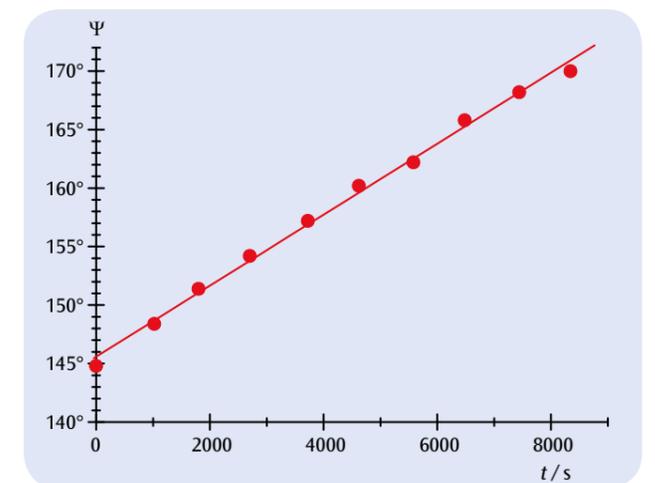


Fig. 2 Courbe de mesure relevée à la latitude géographique = 50°


**OBJECTIF**

Mesure des oscillations d'un pendule élastique vertical au moyen d'un détecteur de mouvement à ultrasons

**RESUME**

Les mouvements oscillants d'un pendule élastique vertical sont un exemple classique d'oscillation harmonique. Dans l'expérience, ces oscillations sont enregistrées au moyen d'un détecteur de mouvements à ultrasons qui mesure la distance entre la masse accrochée au ressort et le détecteur.

**EXERCICES**

- Enregistrement de l'oscillation harmonique d'un pendule élastique vertical en fonction du temps au moyen d'un détecteur de mouvement à ultrasons.
- Mesure de la période d'oscillation  $T$  pour différentes combinaisons de constantes de raideur  $k$  du ressort et de masses  $m$ .

**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre | Appareil                                      | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Jeu de 5 ressorts cylindriques (Loi de Hooke) | 1003376    |
| 1      | Jeu de masses à fente 10 x 10 g               | 1003227    |
| 1      | Jeu de masses à fente 5 x 50 g                | 1003229    |
| 1      | Socle pour statif, trépied, 150 mm            | 1002835    |
| 1      | Tige statif, 1000 mm                          | 1002936    |
| 1      | Noix de serrage avec crochet                  | 1002828    |
| 1      | Capteur de mouvement à ultrasons              | 1000559    |
| 1      | 3B NETlab™                                    | 1000544    |
| 1      | 3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)                  | 1000540 ou |
|        | 3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)                  | 1000539    |
| 1      | Double mètre à ruban de poche                 | 1002603    |

**GENERALITES**

Les oscillations sont générées lorsqu'un système écarté de sa position d'équilibre est renvoyé par une force excitatrice dans cette même position d'équilibre. On parle d'oscillation harmonique lorsque la force de rappel du système est à tout moment proportionnelle à l'écart de la position d'équilibre. Les mouvements oscillants d'un pendule élastique vertical en sont un exemple classique, la force de rappel étant alors proportionnelle à l'élongation du ressort. Cette proportionnalité entre l'élongation et la force de rappel du ressort est décrite par la loi de Hooke.

**1**
**OBJECTIF**

Mesure des oscillations d'un pendule élastique vertical au moyen d'un détecteur de mouvement à ultrasons

**RESUME**

Les mouvements oscillants d'un pendule élastique vertical sont un exemple classique d'oscillation harmonique. Dans l'expérience, ces oscillations sont enregistrées au moyen d'un détecteur de mouvements à ultrasons qui mesure la distance entre la masse accrochée au ressort et le détecteur.

La relation entre l'élongation  $x$  et la force de rappel  $F$  est donc régie par l'équation

$$(1) \quad F = -k \cdot x \quad \text{où} \\ k \text{ est la constante de raideur du ressort.}$$

Par conséquent, pour une masse  $m$  accrochée au ressort cylindrique, l'équation du mouvement est de la forme

$$(2) \quad m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + k \cdot x = 0,$$

tant que la masse du ressort elle-même ainsi qu'une éventuelle force de frottement sont négligeables.

En règle générale, la solution à l'équation de mouvement s'écrit :

$$(3) \quad x(t) = A \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t + \varphi\right),$$

comme cela est confirmé par l'enregistrement des oscillations harmoniques d'un pendule élastique vertical en fonction du temps, au moyen d'un détecteur de mouvement à ultrasons et en adaptant une fonction sinusoïdale aux données de mesure.

Le détecteur de mouvements à ultrasons mesure la distance entre la masse accrochée au pendule et le détecteur. Par conséquent, mis à part un décalage du point zéro qui peut être compensé par calibration, la grandeur de mesure correspond directement à la valeur  $x(t)$  observée dans l'équation 3. La période d'oscillation  $T$  est définie comme l'intervalle entre deux points où une onde sinusoïdale traverse l'axe zéro dans le même sens. À partir de l'équation (3), on obtient :

$$(4) \quad T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Afin de vérifier l'équation (4), on réalise des mesures avec différentes combinaisons de masse  $m$  et de constante de raideur  $k$  du ressort, puis on détermine la période d'oscillation en mesurant l'écart entre les deux points où une courbe traverse l'axe zéro dans les données enregistrées.

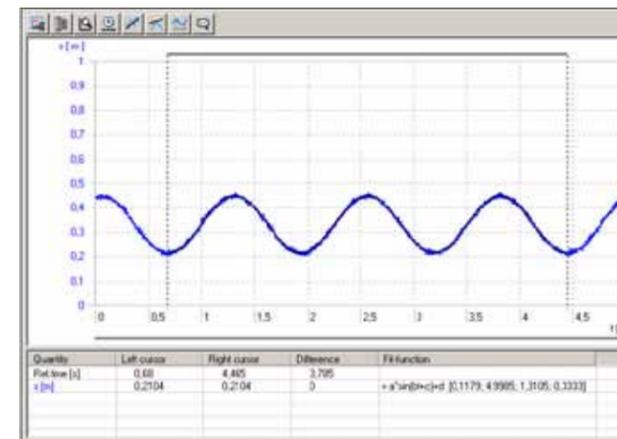


Fig. 1 Données des mouvements oscillants enregistrées après adaptation à une fonction sinus

**EVALUATION**

À partir de l'équation (4), on déduit la formule :

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{k} \cdot m$$

Par conséquent, les données de mesure sont représentées dans un graphe  $T^2/m$  pour différentes constantes de raideur  $k$  du ressort comme paramètres. Les valeurs mesurées se situent dans les limites de tolérance de mesure sur une droite passant par l'origine dont le gradient est calculé au moyen d'un autre graphe.

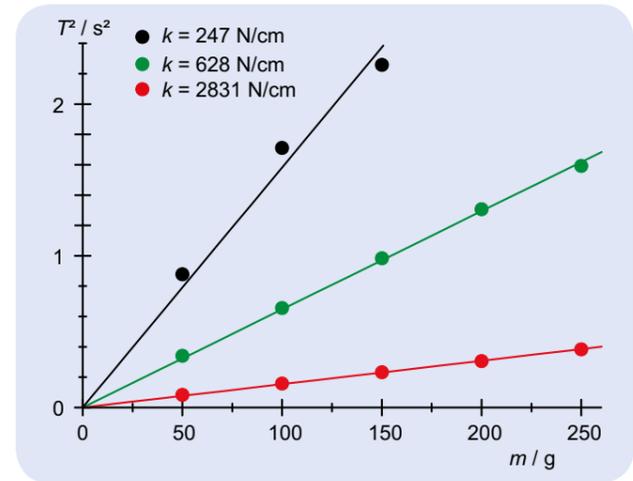


Fig. 2  $T^2$  en fonction de  $m$

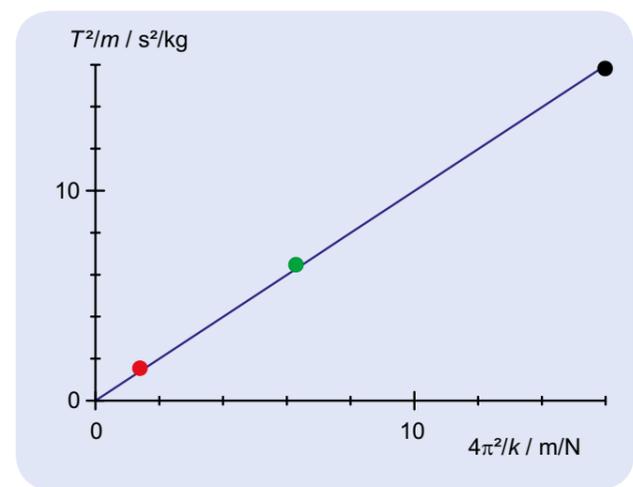
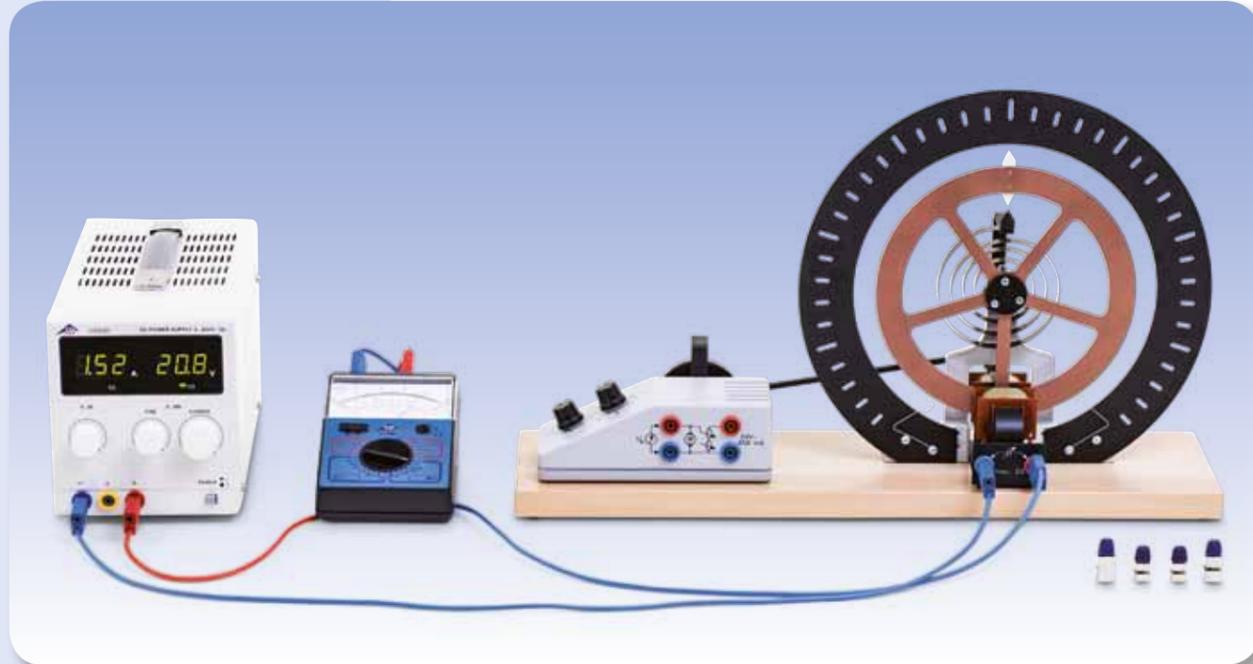


Fig. 3  $\frac{T^2}{m}$  en fonction de  $\frac{4\pi^2}{k}$



## EXERCICES

- Mesurer le temps d'oscillation  $T$  pour différentes déviations et vitesses initiales.
- Déterminer la constante d'atténuation  $\delta$  du pendule tournant atténué.

## OBJECTIF

Mesurer et analyser des oscillations tournantes harmoniques libres

## RESUME

Le pendule tournant d'après Pohl permet d'étudier des oscillations tournantes harmoniques libres. Seuls le couple de rotation de rappel d'un ressort en volute et le couple de rotation atténuant d'un frein à courant de Foucault réglable agissent sur le pendule. Dans l'expérience, nous allons démontrer l'indépendance du temps d'oscillation vis-à-vis de la déviation et la vitesse initiales et analyser l'atténuation des amplitudes d'oscillation.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Pendule tournant d'après Pohl                       | 1002956    |
| 1      | Chronomètre mécanique, 15 min                       | 1003369    |
| 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    |
| 1      | Multimètre analogique AM50                          | 1003073    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm                | 1002843    |

1

## GENERALITES

Le pendule tournant d'après Pohl permet d'étudier des oscillations tournantes harmoniques libres. Seuls le couple de rotation de rappel d'un ressort en volute et le couple de rotation atténuant d'un frein à courant de Foucault réglable agissent sur le pendule.

Équation de mouvement pour l'angle de déviation  $\varphi$  d'une oscillation tournante libre du pendule tournant :

$$(1) \quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2 \cdot \delta \cdot \frac{d\varphi}{dt} + \omega_0^2 \cdot \varphi = 0$$

$$\text{avec } \delta = \frac{k}{2J}, \quad \omega_0^2 = \frac{D}{J}$$

$J$  : moment d'inertie  
 $D$  : constante de rappel  
 $k$  : coefficient d'atténuation

Tant que l'atténuation n'est pas trop grande et que la condition  $\delta < \omega_0$  est remplie, la solution de l'équation de mouvement est la suivante :

$$(2) \quad \varphi(t) = \varphi_0 \cdot e^{-\delta t} \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi)$$

$$\text{avec } \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

Dans ce cas, l'amplitude initiale  $\varphi_0$  et l'angle de phase  $\psi$  sont des paramètres quelconques qui dépendent de la déviation et de la vitesse du pendule tournant à l'instant  $t = 0$ . Le pendule oscille donc pendant

$$(3) \quad T = \frac{2\pi}{\omega}$$

L'amplitude d'oscillation diminue au fil du temps d'après

$$(4) \quad \hat{\varphi}(t) = \varphi_0 \cdot e^{-\delta t}$$

Dans l'expérience, nous allons étudier des oscillations à différentes atténuations déterminées par l'intensité de courant réglable du frein à courant de Foucault. Le temps d'oscillation est mesuré à l'aide d'un chronomètre. Il s'avère qu'à une atténuation donnée, le temps d'oscillation ne dépend pas de la déviation initiale ni de la vitesse initiale.

Pour déterminer l'atténuation, on note les déviations décroissantes du pendule à droite et à gauche, le pendule, pour des raisons de simplicité, démarrant sans vitesse initiale.

## EVALUATION

L'équation (4) définit l'amplitude d'oscillation comme une grandeur positive. Il s'agit donc du nombre de déviations à droite et à gauche. En appliquant le logarithme naturel de ces déviations par rapport au temps, on obtient une droite de pente  $-\delta$ . En réalité, on observe des écarts du comportement linéaire, car la force des frottements n'est pas – comme supposé – tout à fait proportionnelle à la vitesse.

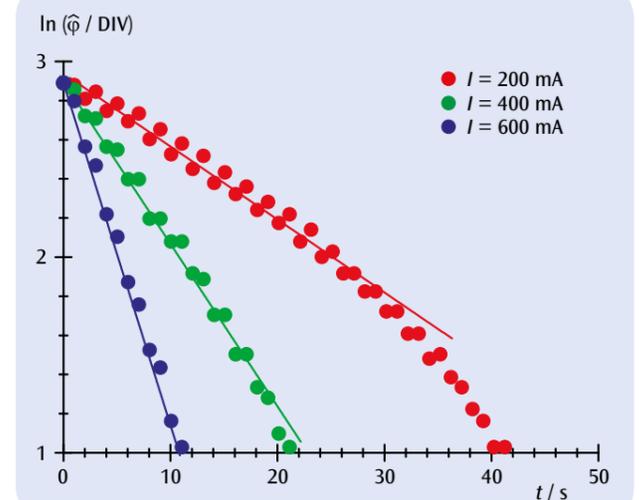
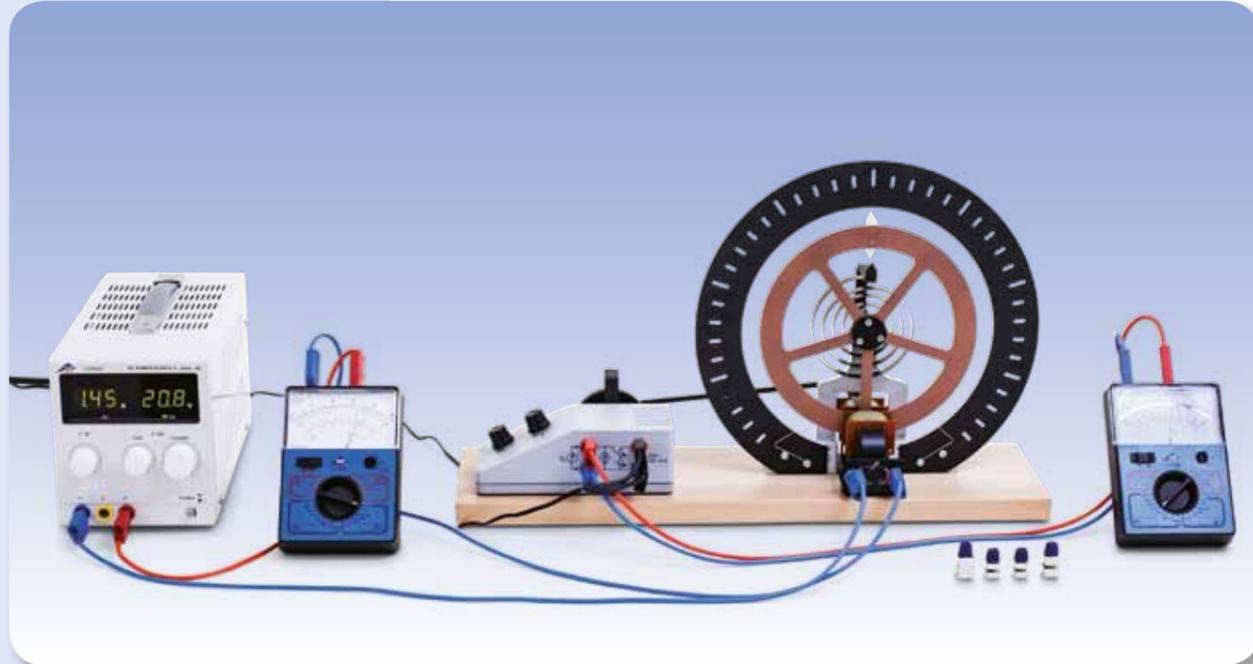


Fig. 1  $\ln(\hat{\varphi})$  en fonction du temps à différentes atténuations



## EXERCICES

- Mesurer l'amplitude d'oscillations forcées en fonction de la fréquence d'excitation pour différentes atténuations.
- Observer le déphasage entre l'excitation et l'oscillation en présence des très petites et très grandes fréquences d'excitation.

## OBJECTIF

Mesurer et analyser des oscillations forcées

## RESUME

Le pendule tournant de Pohl convient également pour étudier des oscillations forcées. Pour cela, le système oscillant est relié à la barre de l'excitateur qui est déplacée par un moteur à courant continu à régime réglable et qui détend et contracte périodiquement le ressort de rappel en volute. Dans l'expérience, nous allons mesurer pour différentes atténuations l'amplitude en fonction de la fréquence d'excitation et observer le déphasage entre l'excitation et l'oscillation.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Pendule tournant d'après Pohl                       | 1002956    |
| 1      | Chronomètre mécanique, 15 min                       | 1003369    |
| 1      | Alimentation secteur 24 V, 700 mA (230 V, 50/60 Hz) | 1000681 ou |
|        | Alimentation secteur 24 V, 700 mA (115 V, 50/60 Hz) | 1000680    |
| 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 analogique AM50                          | 1003073    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm                | 1002843    |

2

## GENERALITES

Le pendule tournant de Pohl convient également pour étudier des oscillations forcées. Pour cela, le système oscillant est relié à la barre de l'excitateur qui est déplacée par un moteur à courant continu à régime réglable et qui détend et contracte périodiquement le ressort de rappel en volute

L'équation de mouvement du système est

$$(1) \quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2 \cdot \delta \cdot \frac{d\varphi}{dt} + \omega_0^2 \cdot \varphi = A \cdot \cos(\omega_E \cdot t)$$

$$\text{avec} \quad \delta = \frac{k}{2J}, \quad \omega_0^2 = \frac{D}{J}, \quad A = \frac{M_0}{J}$$

 $J$  : moment d'inertie $D$  : constante de rappel $k$  : coefficient d'atténuation $M_0$  : amplitude du couple de rotation externe $\omega_E$  : fréquence angulaire du couple de rotation externe

La solution de cette équation de mouvement se compose d'une part homogène et d'une part inhomogène. La part homogène correspond à l'oscillation atténuée libre qui est étudiée dans l'expérience UE1050500. Elle diminue de façon exponentielle au fil du temps et, après la phase appelée « transitoire », elle devient négligeable par rapport à la part inhomogène. En revanche, la part inhomogène

$$(2) \quad \varphi(t) = \varphi_E \cdot \cos(\omega_E \cdot t - \psi_E)$$

est liée au couple de rotation externe et reste conservée aussi longtemps que celui-ci agit. Son amplitude

$$(3) \quad \varphi_E = \frac{A_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_E^2)^2 + 4 \cdot \delta^2 \cdot \omega_E^2}}$$

est d'autant plus grande que la fréquence d'excitation  $\omega_E$  se situe à hauteur de la fréquence propre  $\omega_0$  du pendule tournant. Dans le cas de  $\omega_E = \omega_0$ , on parle de résonance.

Le déphasage

$$(4) \quad \psi_E = \arctan\left(\frac{2 \cdot \delta \cdot \omega_E}{\omega_0^2 - \omega_E^2}\right)$$

indique que les déviations du pendule suivent l'excitation. Pour de très petites fréquences, il est pratiquement nul, mais augmente avec la fréquence et atteint  $90^\circ$  à hauteur de la fréquence de résonance. Enfin, en présence de très fortes fréquences d'excitation, l'excitation et l'oscillation sont déphasées de  $180^\circ$ .

## EVALUATION

Les amplitudes mesurées des oscillations atténuées sont représentées par rapport à la fréquence d'excitation. Il en résulte différentes courbes de mesure qui peuvent être décrites par l'équation (4), à condition d'avoir sélectionné les bons paramètres d'atténuation  $\delta$ .

On observe de faibles écarts par rapport aux valeurs trouvées pour l'atténuation dans l'expérience UE1050500. Cela s'explique par le fait que le frottement n'est pas – comme supposé – exactement proportionnel à la vitesse.

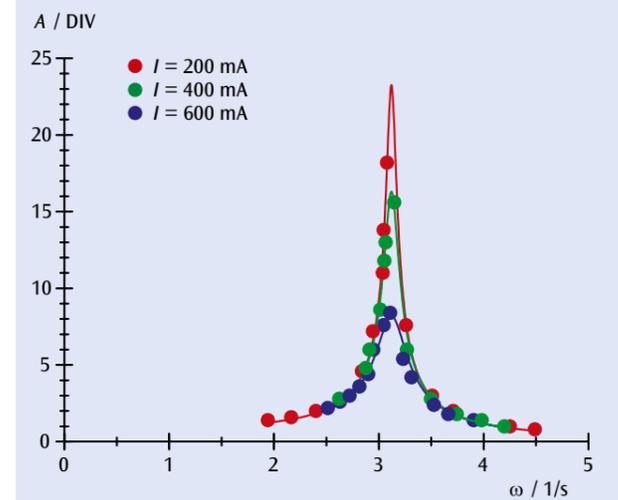


Fig. 1 Courbes de résonance avec différentes atténuations



## EXERCICES

- Enregistrement de l'oscillation en phase et détermination de la période d'oscillation  $T_+$ .
- Enregistrement de l'oscillation en opposition de phase et détermination de la période d'oscillation  $T_-$ .
- Enregistrement d'une oscillation couplée et détermination de la période d'oscillation  $T$  ainsi que de la période de battement  $T_\Delta$ .
- Comparaison des valeurs mesurées avec celles obtenues à partir des périodes d'oscillation propres  $T_+$  et  $T_-$ .

## OBJECTIF

Enregistrement et évaluation des oscillations de deux pendules identiques couplés

## RESUME

L'oscillation entre deux pendules identiques couplés peut être caractérisée par la période d'oscillation et la période de battement. La période de battement représente l'écart entre deux moments où un pendule oscille à une amplitude minimum. Les deux grandeurs peuvent être calculées à partir des deux périodes de battement propres pour l'oscillation en phase et l'oscillation en opposition de phase et des pendules couplés.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 2      | Pendule avec capteur de déplacement (230 V, 50/60 Hz) | 1000763 ou |
|        | Pendule avec capteur de déplacement (115 V, 50/60 Hz) | 1000762    |
| 1      | Ressort cylindrique 3,0 N/m                           | 1002945    |
| 2      | Etau de fixation                                      | 1002832    |
| 2      | Tige statif, 1000 mm                                  | 1002936    |
| 1      | Tige statif, 470 mm                                   | 1002934    |
| 4      | Noix universelle                                      | 1002830    |
| 2      | Cordon HF, BNC / douille 4 mm                         | 1002748    |
| 1      | 3B NET/log™ (230 V, 50/60 Hz)                         | 1000540 ou |
|        | 3B NET/log™ (115 V, 50/60 Hz)                         | 1000539    |
| 1      | 3B NET/lab™   | 1000544    |

## GENERALITES

Lorsque deux pendules couplés oscillent, de l'énergie va et vient entre les deux pendules. Si les deux pendules sont identiques et qu'ils sont excités de manière à ce qu'un pendule soit au repos au début, tandis que l'autre oscille, la transmission d'énergie est totale. C'est-à-dire qu'un pendule est entièrement au repos, tandis que l'autre oscille avec une amplitude

maximale. La durée entre les deux arrêts d'un pendule ou, d'une manière générale, entre deux moments où le pendule oscille avec une amplitude minimale, est la période de battement  $T_\Delta$ .

Les oscillations entre deux pendules mathématiques identiques couplés peuvent être décrites comme superposition de deux oscillations propres. On peut observer ces oscillations propres en excitant les deux pendules à des oscillations en phase ou en opposition de phase. Dans le premier cas, les pendules sans influence du couplage oscillent à la fréquence des pendules non couplés ; dans le second cas, sous l'influence maximale du couplage, ils oscillent à la fréquence propre maximale. Toutes les autres oscillations peuvent être représentées comme des superpositions de ces deux oscillations propres.

On obtient pour le mouvement des pendules l'équation suivante :

$$(1) \quad \begin{aligned} L \cdot \ddot{\varphi}_1 + g \cdot \varphi_1 + k \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) &= 0 \\ L \cdot \ddot{\varphi}_2 + g \cdot \varphi_2 + k \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) &= 0 \end{aligned}$$

$g$  : Accélération de la pesanteur,  $L$  : Longueur de pendule,  $k$  : Constante de couplage

Pour les grandeurs auxiliaires  $\varphi_- = \varphi_1 - \varphi_2$  et  $\varphi_+ = \varphi_1 + \varphi_2$  (arbitraires dans un premier temps), on obtient les équations suivantes :

$$(2) \quad \begin{aligned} L \cdot \ddot{\varphi}_+ + g \cdot \varphi_+ &= 0 \\ L \cdot \ddot{\varphi}_- + (g + 2k) \cdot \varphi_- &= 0 \end{aligned}$$

Leurs solutions

$$(3) \quad \begin{aligned} \varphi_+ &= a_+ \cdot \cos(\omega_+ t) + b_+ \cdot \sin(\omega_+ t) \\ \varphi_- &= a_- \cdot \cos(\omega_- t) + b_- \cdot \sin(\omega_- t) \end{aligned}$$

avec les fréquences angulaires

$$(4) \quad \begin{aligned} \omega_+ &= \sqrt{\frac{g}{L}} \\ \omega_- &= \sqrt{\frac{g + 2k}{L}} \end{aligned}$$

correspondent aux oscillations propres décrites en cas d'excitation en phase ou en opposition de phase ( $\varphi_+ = 0$  en phase et  $\varphi_- = 0$  en opposition de phase).

Les mouvements des pendules peuvent être calculés à partir de la somme ou la différence des deux grandeurs auxiliaires. On obtient la solution

$$(5) \quad \begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{1}{2} \cdot (a_+ \cdot \cos(\omega_+ t) + b_+ \cdot \sin(\omega_+ t) + a_- \cdot \cos(\omega_- t) + b_- \cdot \sin(\omega_- t)) \\ \varphi_2 &= \frac{1}{2} \cdot (a_+ \cdot \cos(\omega_+ t) + b_+ \cdot \sin(\omega_+ t) - a_- \cdot \cos(\omega_- t) - b_- \cdot \sin(\omega_- t)) \end{aligned}$$

Dans un premier temps, les paramètres  $a_+$ ,  $a_-$ ,  $b_+$  et  $b_-$  sont des gran-

deurs quelconques qui peuvent être calculées depuis l'état d'oscillation des deux pendules au moment  $t = 0$ .

Le cas le plus simple à interpréter est le suivant : au moment 0, le pendule 1 en position zéro possède une vitesse angulaire initiale  $\psi_0$ , tandis que le pendule 2 en position zéro est au repos.

$$(6) \quad \begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\psi_0}{\omega_+} \cdot \sin(\omega_+ t) + \frac{\psi_0}{\omega_-} \cdot \sin(\omega_- t) \right) \\ \varphi_2 &= \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\psi_0}{\omega_+} \cdot \sin(\omega_+ t) - \frac{\psi_0}{\omega_-} \cdot \sin(\omega_- t) \right) \end{aligned}$$

L'équation suivante s'applique alors aux vitesses des deux pendules :

$$(7) \quad \begin{aligned} \dot{\varphi}_1 &= \frac{\psi_0}{2} \cdot (\cos(\omega_+ t) + \cos(\omega_- t)) \\ \dot{\varphi}_2 &= \frac{\psi_0}{2} \cdot (\cos(\omega_+ t) - \cos(\omega_- t)) \end{aligned}$$

Après la conversion mathématique, on obtient

$$(8) \quad \begin{aligned} \varphi_1 &= \psi_0 \cdot \cos(\omega_\Delta t) \cdot \cos(\omega t) \\ \varphi_2 &= \psi_0 \cdot \sin(\omega_\Delta t) \cdot \cos(\omega t) \end{aligned} \quad \text{avec (9) } \begin{aligned} \omega_\Delta &= \frac{\omega_- - \omega_+}{2} \\ \omega &= \frac{\omega_+ + \omega_-}{2} \end{aligned}$$

Cela correspond à une oscillation des deux pendules avec la même fréquence angulaire  $\omega$ , leurs amplitudes de vitesse  $\dot{\varphi}_1$  et  $\dot{\varphi}_2$  étant modulées avec la fréquence angulaire  $\omega_\Delta$  :

$$(10) \quad \begin{aligned} \dot{\varphi}_1(t) &= \psi_0 \cdot \cos(\omega_\Delta t) \\ \dot{\varphi}_2(t) &= \psi_0 \cdot \sin(\omega_\Delta t) \end{aligned}$$

## EVALUATION

L'équation (4) permet de calculer les périodes d'oscillation  $T_+$  et  $T_-$  de l'oscillation en phase et de l'oscillation en opposition de phase :

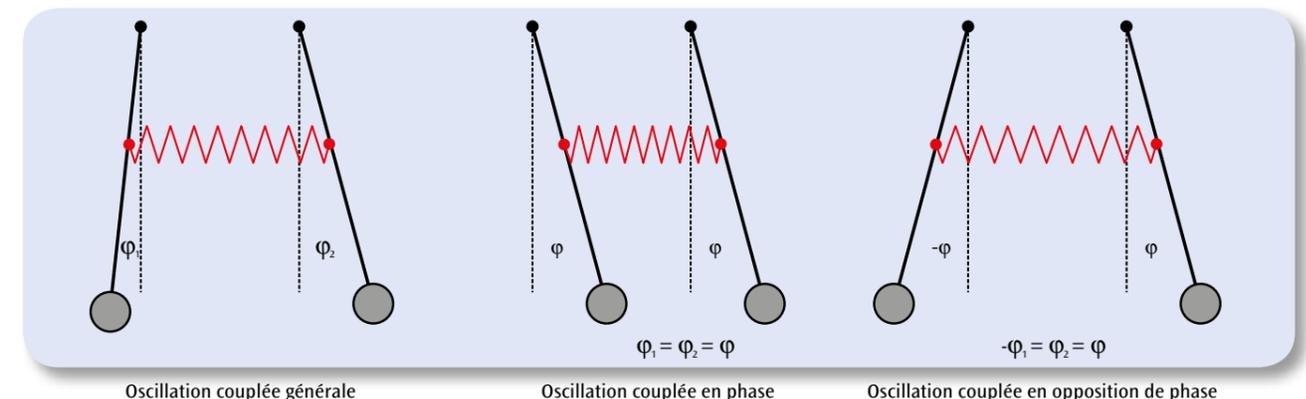
$$T_+ = \frac{2\pi}{\omega_+} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad \text{et} \quad T_- = \frac{2\pi}{\omega_-} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g + 2k}}$$

Pour la période d'oscillation  $T$  de l'oscillation couplée, l'équation (9) engendre :

$$\frac{2\pi}{T} = \omega = \frac{\pi}{T_+} + \frac{\pi}{T_-} \quad \text{et ainsi} \quad T = 2 \cdot \frac{T_+ \cdot T_-}{T_+ + T_-}$$

Habituellement, la modulation d'amplitude décrite dans l'équation (10) est caractérisée par la période de battement  $T_\Delta$ , qui correspond à la durée s'écoulant entre deux arrêts des pendules :

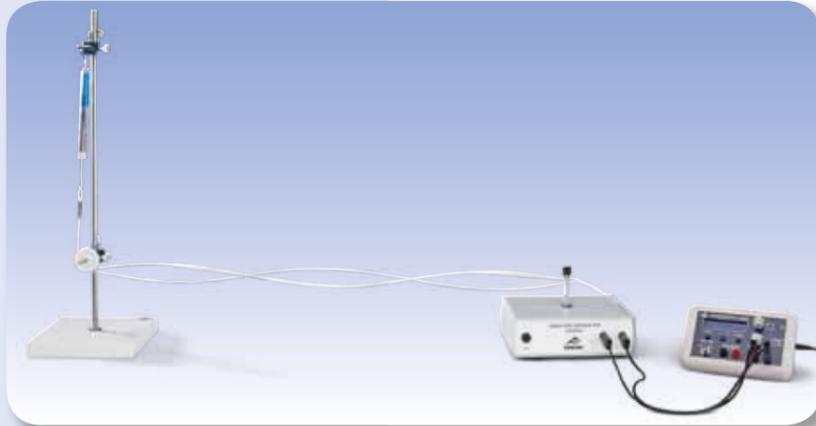
$$\frac{2\pi}{T_\Delta} = \omega_\Delta = \frac{\pi}{T_-} - \frac{\pi}{T_+} \quad \text{et ainsi} \quad T_\Delta = \frac{T_+ \cdot T_-}{T_+ - T_-}$$



Oscillation couplée générale

Oscillation couplée en phase

Oscillation couplée en opposition de phase



## EXERCICES

- Générer des ondes stationnaires longitudinales sur un ressort hélicoïdal et des ondes stationnaires transversales sur une corde.
- Mesurer les fréquences propres  $f_n$  en fonction du nombre  $n$  de nœuds.
- Déterminer les longueurs d'onde correspondantes  $\lambda_n$  et la vitesse d'onde  $c$ .

## OBJECTIF

Étudier des ondes stationnaires sur un ressort hélicoïdal tendu et une corde tendue

## RESUME

Des ondes mécaniques apparaissent par exemple sur un ressort hélicoïdal tendu sous la forme d'ondes longitudinales ou sur une corde tendue sous la forme d'ondes transversales. Dans les deux cas, il se forme des ondes stationnaires si le support est fixé à l'une de ses extrémités, car l'onde incidente et l'onde réfléchie à l'extrémité fixe de même amplitude et de même longueur d'onde se superposent. Si l'autre extrémité est également fixe, les ondes ne peuvent se propager que si des conditions de résonance sont remplies. Dans l'expérience, le ressort hélicoïdal et la corde sont fixés à une extrémité. L'autre extrémité est reliée à une distance  $L$  à un générateur de vibrations qu'un générateur de fonctions amène à émettre des oscillations de faible amplitude et de fréquence réglable  $f$ . Cette extrémité peut également être considérée comme une extrémité à peu près fixe. On mesure les fréquences propres en fonction du nombre de nœuds des ondes stationnaires. Ces données permettront de calculer la vitesse d'onde.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil   | Référence  |
|--------|--|------------|
| 1      | Accessoires pour oscillations de ressort         | 1000703    |
| 1      | Accessoires pour ondes de corde                  | 1008540    |
| 1      | Générateur de vibrations                         | 1000701    |
| 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      | Dynamomètre de précision, 2 N                    | 1003105    |
| 1      | Double mètre à ruban de poche                    | 1002603    |
| 1      | Paire de cordons de sécurité, 75 cm, rouge/bleu  | 1017718    |

## GENERALITES

Des ondes mécaniques apparaissent par exemple sur un ressort hélicoïdal tendu ou sur une corde tendue. Dans le cas du ressort, on parle d'ondes longitudinales, car la déviation est parallèle au sens de propagation. Dans le cas de la corde en revanche, il s'agit d'ondes transversales. Dans les deux cas, il se forme des ondes stationnaires si le support est fixé à l'une de ses extrémités, car l'onde incidente et l'onde réfléchie à l'extrémité fixe de même amplitude et de même longueur

d'onde se superposent. Si l'autre extrémité est également fixée, les ondes ne peuvent se propager que si des conditions de résonance sont remplies.

Soit  $x(x,t)$  la déviation longitudinale / transversale à l'emplacement  $x$  le long du support au moment  $t$ . Dans ce cas,

$$(1) \quad \xi_1(x,t) = \xi_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x)$$

est une onde sinusoïdale se déplaçant vers la droite sur le support. La fréquence  $f$  et la longueur d'onde  $\lambda$  sont corrélées par l'équation

$$(2) \quad c = f \cdot \lambda$$

$c$  : vitesse d'onde

Lorsque cette onde venant de la gauche à  $x = 0$  est réfléchie à une extrémité fixe, il se forme une onde se déplaçant à gauche.

$$(3) \quad \xi_2(x,t) = -\xi_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x)$$

Les deux ondes se superposent en ondes stationnaires

$$(4) \quad \xi(x,t) = 2\xi_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \cdot \sin(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x)$$

Ces superpositions s'appliquent indépendamment du type d'onde et du support.

Si la seconde extrémité est également fixée et qu'elle se trouve à  $x = L$ , il faut qu'à tous les moments  $t$  la condition de résonance

$$(5) \quad \xi(L,t) = 0 = \sin(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot L)$$

soit remplie. Il en résulte pour la longueur d'onde

$$(6a) \quad \frac{2\pi}{\lambda_n} \cdot L = (n+1) \cdot \pi \quad \text{soit} \quad \lambda_n = 2 \cdot \frac{L}{n+1}$$

ou  $L = (n+1) \cdot \frac{\lambda_n}{2}$

et selon l'équation (2) pour la fréquence

$$(6b) \quad f_n = (n+1) \cdot \frac{c}{2 \cdot L}$$

En d'autres termes, la condition de résonance (5) exige que la longueur  $L$  représente très précisément un multiple entier de la demi-longueur d'onde. La fréquence de résonance doit convenir à cette longueur d'onde,  $n$  représentant le nombre de nœuds d'oscillations. Elle est nulle s'il ne se forme qu'un anti-nœud sur la composante fondamentale (voir Fig. 2). Dans l'expérience, le support – une corde ou un ressort – est fixé à une extrémité. L'autre extrémité est reliée à une distance  $L$  à un générateur de vibrations qu'un générateur de fonctions amène à émettre des oscillations de faible amplitude et de fréquence réglable  $f$ . Cette extrémité peut également être considérée comme une extrémité à peu près fixe.

## EVALUATION

Si l'on applique la fréquence de résonance au nombre de nœuds d'oscillations, les points de mesure se situent sur une droite de la pente

$$\alpha = \frac{c}{2 \cdot L}$$

La longueur  $L$  étant connue, on peut alors calculer la vitesse d'onde  $c$ . Les paramètres restant constants, elle dépend de la force de serrage  $F$ , comme le montre la Fig. 5 pour les ondes de la corde.

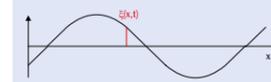


Fig. 1 Représentation pour définir la déviation locale  $x(x,t)$

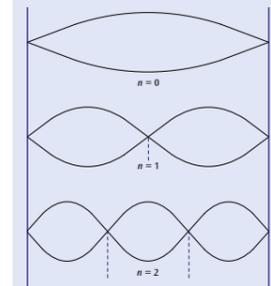


Fig. 2 Ondes stationnaires

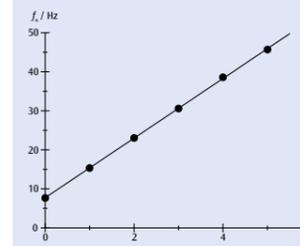


Fig. 3 Fréquence de résonance en fonction du nombre de nœuds pour les ondes du ressort hélicoïdal

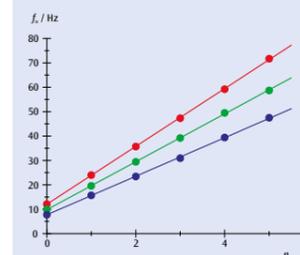


Fig. 4 Fréquence de résonance en fonction du nombre de nœuds pour les ondes de la corde

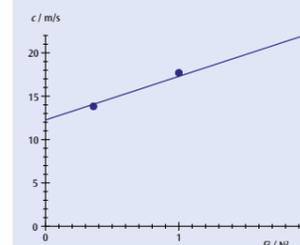
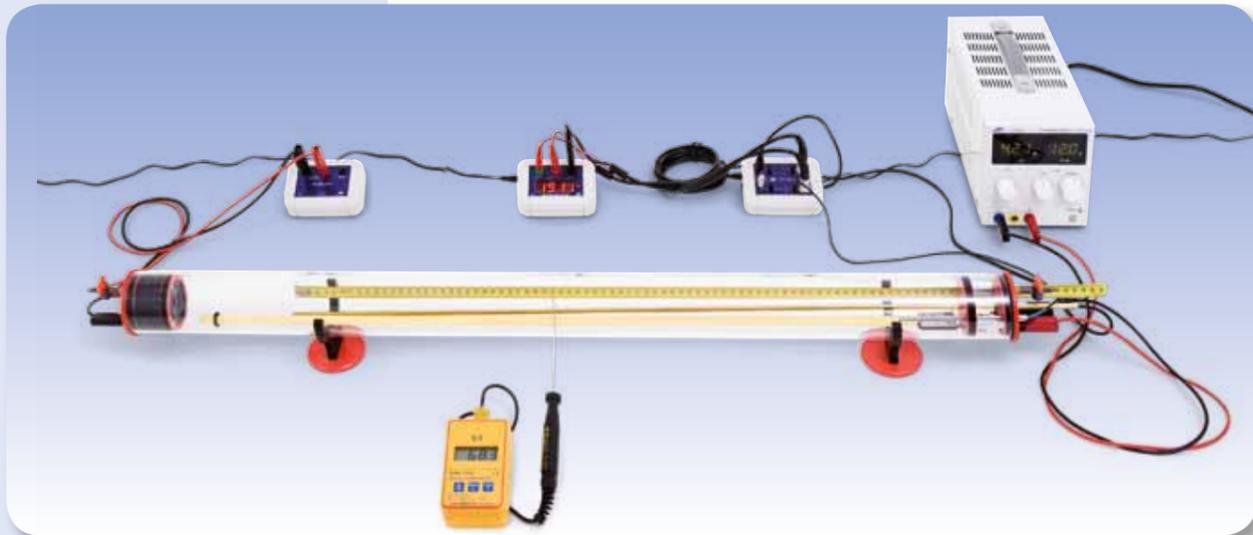


Fig. 5 Vitesse  $c$  des ondes de la corde en fonction de  $F^2$



EXERCICES

- Mesure de la durée  $t$  d'une impulsion acoustique dans l'air à température ambiante en fonction de l'écart  $s$  entre deux sondes microphoniques.
- Confirmation du rapport linéaire entre  $s$  et  $t$ .
- Mesure de la durée  $t$  d'une impulsion acoustique dans l'air à température ambiante en fonction de la température  $T$  avec un écart fixe entre deux sondes microphoniques.
- Détermination de la vitesse du son (vitesse de groupe) en fonction de la température.
- Comparaison avec le résultat du théorème de Laplace.



OBJECTIF

Mesure des durées des impulsions sonores dans un tube de Kundt

RESUME

Dans les gaz, les ondes sonores se propagent sous forme d'ondes longitudinales. La vitesse de groupe coïncide à la vitesse de phase. Au cours de l'expérience, nous allons mesurer dans un tube de Kundt la durée d'une impulsion sonore entre deux sondes microphoniques et en déduire la vitesse du son. La dépendance de la vitesse du son vis-à-vis de la température est vérifiée entre la température ambiante et 50 °C. Le résultat de la mesure coïncide avec celui du théorème de Laplace.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Tube de Kundt E                                     | 1017339    |
| 1      | Générateur d'impulsions K                           | 1017341    |
| 1      | Sonde à microphone, longue tige                     | 1017342    |
| 1      | Sonde à microphone, à courte tige                   | 4008308    |
| 1      | Amplificateur de microphone (230 V, 50/60 Hz)       | 1014520 ou |
|        | Amplificateur de microphone (115 V, 50/60 Hz)       | 1014521    |
| 1      | Compteur de microsecondes (230 V, 50/60 Hz)         | 1017333 ou |
|        | Compteur de microsecondes (115 V, 50/60 Hz)         | 1017334    |
| 1      | Thermoplongeur K                                    | 1017340    |
| 2      | Cordon HF, BNC / douille 4 mm                       | 1002748    |
| 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    |
| 1      | Thermomètre de poche numérique ultra-rapide         | 1002803    |
| 1      | Sonde à immersion NiCr-Ni type K, - 65°C – 550°C    | 1002804    |
| 1      | Paire de cordons de sécurité, 75 cm                 | 1002849    |

Compléments recommandés :  
différents gaz techniques

GENERALITES

Les ondes sonores sont des ondes élastiques se propageant dans des fluides déformables. Leur vitesse dépend des propriétés élastiques du fluide. Dans les gaz simples, ils se propagent exclusivement sous la forme d'ondes longitudinales, la vitesse de groupe coïncidant avec la vitesse de phase.

Selon le théorème de Laplace, les ondes sonores dans les gaz sont considérées comme des modifications adiabatiques de la pression / de la densité. Pour la vitesse du son, on obtient

$$(1) \quad c = \sqrt{\frac{C_p \cdot p}{C_v \cdot \rho}}$$

$p$  : pression,  $\rho$  : densité,  
 $C_p, C_v$  : capacités calorifiques du gaz  
Pour un gaz idéal de température absolue  $T$  :

$$(2) \quad \frac{p}{\rho} = \frac{R \cdot T}{M}$$

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

$M$  : masse molaire

Par conséquent, la vitesse du son est égale à

$$(3) \quad c = \sqrt{\frac{C_p \cdot R \cdot T}{C_v \cdot M}}$$

Pour les différences de température  $\Delta T$  pas trop élevées en comparaison avec une température de référence  $T_0$ , la vitesse du son dépend linéairement du changement de température  $\Delta T$  :

$$(4) \quad c = \sqrt{\frac{C_p \cdot R \cdot T_0}{C_v \cdot M}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta T}{2 \cdot T_0}\right)$$

En choisissant de l'air sec comme gaz idéal, on trouve souvent l'indication suivante pour la vitesse du son :

$$(5) \quad c(T) = \left(331,3 + 0,6 \cdot \frac{\Delta T}{K}\right) \frac{m}{s}$$

$T_0 = 273,15 K = 0^\circ C$

Au cours de l'expérience, nous allons mesurer dans un tube de Kundt la durée  $t$  d'une impulsion sonore entre deux sondes microphoniques séparées de la distance  $s$ . L'impulsion sonore résulte du mouvement brusque d'une membrane de haut-parleur qui est commandé par une impulsion de tension à front montant. La mesure de durée à haute résolution avec un compteur à la microseconde près démarre lorsque l'impulsion sonore atteint la première sonde microphonique et s'arrête lorsque la seconde sonde se situant à la distance  $s$  est atteinte.

Pour les mesures de durée en fonction de la température, une cartouche chauffante réchauffe jusqu'à 50 °C l'air dans le tube de Kundt. Pendant la phase de refroidissement, la répartition de la température est suffisamment homogène. Ainsi suffit-il de mesurer la température à un seul point dans le tube de Kundt.

Une olive de tuyau permet d'introduire d'autres gaz techniques que de l'air dans le tube de Kundt.

EVALUATION

On calcule la vitesse du son à partir du quotient du parcours  $s$  et de la durée  $t$  :

$$c = \frac{s}{t}$$

Dans la Fig. 2, elle est la valeur inverse de la pente de la droite. La dépendance de la vitesse du son vis-à-vis de la température est décrite par l'équation 3 avec les paramètres

$$M = 28,97 \frac{g}{Mol} \quad \frac{C_p}{C_v} = \frac{7}{5}$$

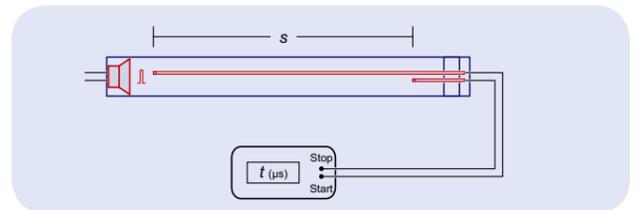


Fig. 1 Représentation schématique du montage expérimental

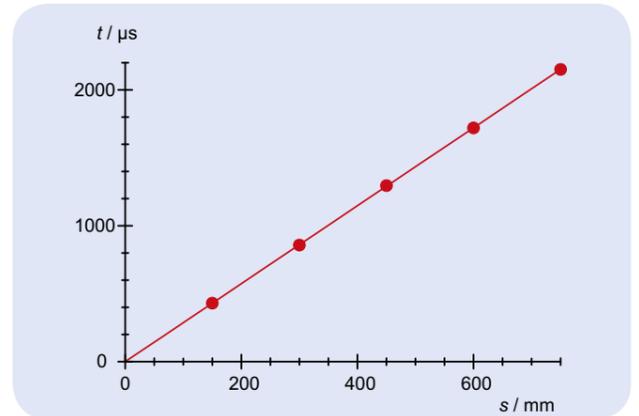


Fig. 2 Durée de son  $t$  dans l'air en fonction du parcours  $s$  à température ambiante.

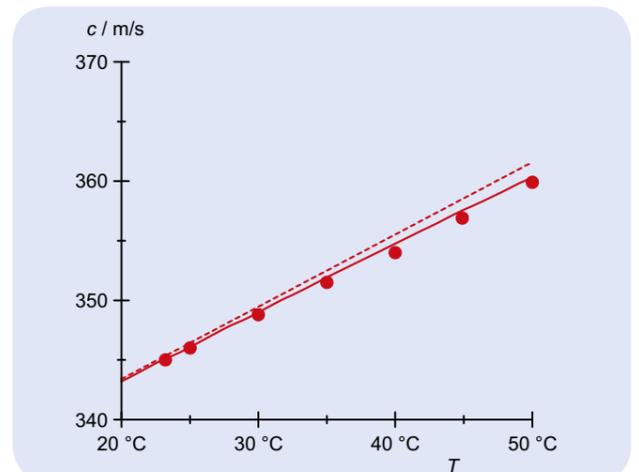
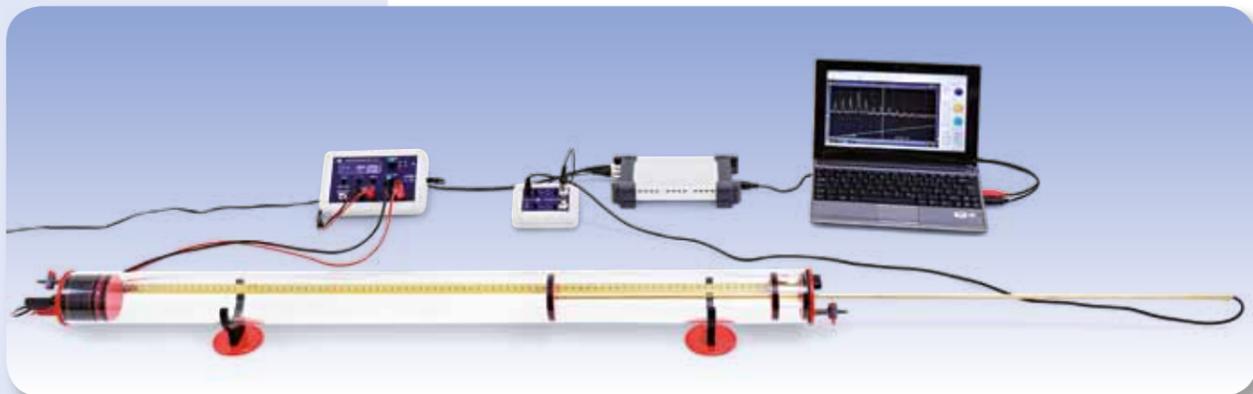


Fig. 3 Vitesse du son  $c$  dans l'air en fonction de la température  $T$   
Ligne continue : calculée avec l'équation 3  
Ligne discontinue : calculée avec l'équation 5



EXERCICES

- Générer des ondes stationnaires sonores dans un tube de Kundt fermé des deux côtés.
- Mesurer la fréquence de base en fonction de la longueur du tube de Kundt.
- Mesurer les fréquences de la composante fondamentale et de l'harmonique avec une longueur de tube fixe
- Déterminer la vitesse d'onde à partir des fréquences de résonance.

OBJECTIF

Générer et mesurer les ondes stationnaires sonores dans un tube de Kundt

RESUME

Dans les gaz, les ondes sonores se propagent sous forme d'ondes longitudinales. La vitesse de groupe coïncide à la vitesse de phase. Au cours de l'expérience, on génère des ondes stationnaires dans un tube de Kundt fermé des deux côtés et on mesure la fréquence de base en fonction de la longueur de tube ainsi que les fréquences de la composante fondamentale et de l'harmonique à une longueur de tube fixe. La vitesse d'onde est calculée à partir des fréquences de résonance, puis représentée sous forme graphique.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil   | Référence  |
|--------|--|------------|
| 1      | Tube de Kundt E                                  | 1017339    |
| 1      | Sonde à microphone, à long                       | 1017342    |
| 1      | Amplificateur de microphone (115 V, 50/60 Hz)    | 1014521 ou |
|        | Amplificateur de microphone (230 V, 50/60 Hz)    | 1014520    |
| 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    |
| 1      | Multimètre analogique AM50                       | 1003073    |
| 1      | Cordon HF, BNC / douille 4 mm                    | 1002748    |
| 1      | Paire de cordons de sécurité, 75 cm              | 1002849    |
| 1      | Cordon HF  | 1002746    |

GENERALITES

Dans un tube de Kundt, on peut, à l'aide d'un haut-parleur, générer des ondes stationnaires en produisant des ondes sonores qui présentent une fréquence de résonance adéquate et qui sont réfléchies à l'autre extrémité d'une paroi. En connaissant la longueur du tube, on peut déterminer la vitesse des ondes à partir de la fréquence de résonance et du numéro de l'harmonique.

Dans l'air et dans d'autres gaz, les ondes sonores se propagent sous forme de modifications rapides de pression et de densité. Le plus simple est de les décrire à l'aide de la pression acoustique, qui se

superpose à la pression atmosphérique. Comme variante à la pression acoustique  $p$ , on peut aussi se servir de la vitesse acoustique  $v$  pour décrire une onde sonore, c'est-à-dire la vitesse moyenne des particules à l'endroit  $x$  dans le fluide oscillant au moment  $t$ . La pression et la vitesse acoustiques sont corrélées par ex. par l'équation de mouvement d'Euler

$$(1) \quad -\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \cdot \frac{\partial v}{\partial t}$$

$\rho_0$  : densité du gaz

Dans le tube de Kundt, les ondes sonores se propagent le long du tube. Elles peuvent donc être décrites par une équation d'onde unidimensionnelle qui s'applique tant à la pression qu'à la vitesse acoustique :

$$(2) \quad \text{ou} \quad \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2}$$

$c$  : vitesse du son

Dans l'expérience, on observe des ondes harmoniques qui sont réfléchies à l'extrémité du tube de Kundt. Comme solutions de l'équation d'onde, on observe donc les superpositions d'ondes incidentes et réfléchies.

$$(3) \quad p = p_{0>} \cdot e^{2\pi i \left( f t + \frac{x}{\lambda} \right)} + p_{0<} \cdot e^{2\pi i \left( f t - \frac{x}{\lambda} \right)}$$

$p_{0>}, v_{0>}$  : amplitudes de l'onde incidente,  
 $p_{0<}, v_{0<}$  : amplitudes de l'onde réfléchie,  
 $f$  : fréquence,  $\lambda$  : longueur d'onde,

Avec

$$(4) \quad f \cdot \lambda = c$$

En appliquant ces solutions à l'équation (1) et en considérant séparément les ondes incidentes et réfléchies, on obtient le rapport suivant :

$$(5) \quad p_{0>} = v_{0>} \cdot Z \quad \text{et} \quad p_{0<} = v_{0<} \cdot Z.$$

La grandeur

$$(6) \quad Z = c \cdot \rho_0$$

est l'impédance acoustique caractéristique qui correspond à l'impédance caractéristique du fluide. Elle joue un rôle important lorsqu'on observe les réflexions d'une onde sonore contre une paroi d'une impédance  $W$  :

Dans ce cas :

$$(7) \quad r_v = \frac{v_{0<}}{v_{0>}} = \frac{Z-W}{Z+W} \quad \text{et} \quad r_p = \frac{p_{0<}}{p_{0>}} = \frac{\frac{1}{Z} - \frac{1}{W}}{\frac{1}{Z} + \frac{1}{W}}$$

Dans l'expérience,  $W$  est sensiblement supérieure à  $Z$  et, par conséquent,  $r_v = 1$  et  $r_p = -1$ .

Si, pour des raisons de simplicité, on imagine la paroi à  $x = 0$ , il résulte de (3) pour la part spatiale de l'onde sonore :

$$(8) \quad p = p_{0>} \cdot \left( e^{-2\pi i \frac{x}{\lambda}} + e^{+2\pi i \frac{x}{\lambda}} \right) \cdot e^{-2\pi i f t}$$

$$= 2 \cdot p_{0>} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) \cdot e^{-2\pi i f t}$$

et

$$v = v_{0>} \cdot \left( e^{-2\pi i \frac{x}{\lambda}} - e^{+2\pi i \frac{x}{\lambda}} \right) \cdot e^{-2\pi i f t}$$

$$= -2 \cdot i \cdot v_{0>} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) \cdot e^{-2\pi i f t}$$

La réalité physique ne retient que les parts réelles de ces termes qui correspondent à des ondes stationnaires sonores dont la pression acoustique contre la paroi (donc à  $x = 0$ ) présente un anti-nœud, tandis que la vitesse

acoustique  $v$  montre un nœud. En outre, la vitesse précède la pression d'un déphasage de  $90^\circ$ .

Dans l'écart  $L$  avec la paroi, les ondes sonores sont générées au moyen d'un haut-parleur qui oscille à la fréquence  $f$ . Là, la pression forme également un anti-nœud et la vitesse acoustique un nœud. Ces conditions ne peuvent être réunies que si  $L$  constitue un multiple entier d'une demi-longueur d'onde :

$$(9) \quad L = n \cdot \frac{\lambda_n}{2}$$

Par conséquent, en raison de (3), les fréquences doivent remplir la condition de résonance

$$(10) \quad f_n = n \cdot \frac{c}{2 \cdot L}$$

Dans l'expérience, la fréquence  $f$  du haut-parleur varie en permanence, tandis qu'une sonde microphonique mesure la pression acoustique sur la paroi de réflexion. La résonance est obtenue lorsque le signal microphonique présente une amplitude maximale.

EVALUATION

Conformément à (9), les longueurs d'onde font partie des fréquences de résonance  $f_n$  déterminées

$$\lambda_n = \frac{2 \cdot L}{n}$$

Pour confirmer (3) et déterminer la vitesse d'onde, ces valeurs sont représentées dans un diagramme  $f \cdot \lambda$ .

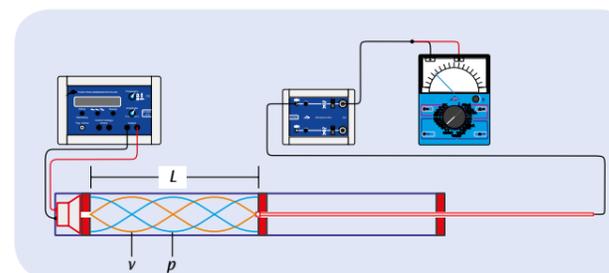


Fig. 1 Représentation schématique du montage expérimental

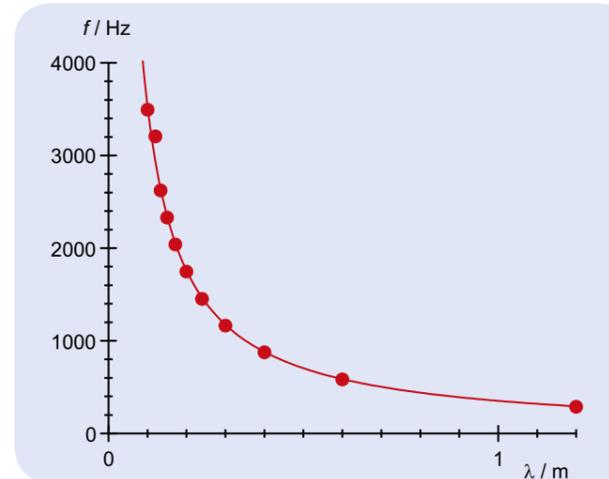
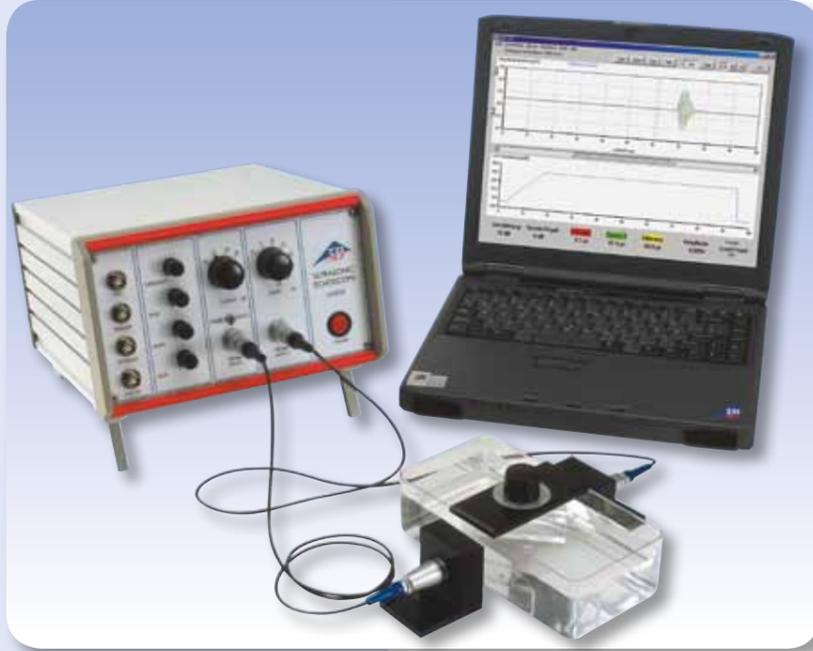


Fig. 2 Diagramme fréquence / longueurs d'onde




**OBJECTIF**

Détermination des vitesses du son pour des ondes longitudinales et transversales dans des corps solides

**RESUME**

Dans des corps solides, le son se propage sous forme d'ondes longitudinales et transversales. Les vitesses du son des deux ondes divergent considérablement, la vitesse longitudinale du son étant déterminée par le module d'élasticité du corps solide, tandis que la vitesse transversale du son dépend du module de cisaillement. Il est possible de déterminer les constantes élastiques du corps solide en mesurant les deux vitesses du son.

**EXERCICES**

- Détermination de la vitesse du son pour des ondes longitudinales dans le polyméthacrylate de méthyle à partir des temps de propagation d'un signal ultrasonique de 1 MHz.
- Mesure de la transmission d'ondes sonores longitudinales et transversales dans un corps solide en utilisant une plaque plane parallèle, placée obliquement.
- Détermination des vitesses du son pour des ondes longitudinales et transversales à partir des angles critiques de la réflexion totale.
- Détermination du module d'élasticité  $E$ , du module de cisaillement  $G$  et du coefficient de Poisson  $\mu$  du corps solide observé à partir des deux vitesses du son.

**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre | Appareil                                     | Référence |
|--------|--|-----------|
| 1      | Echoscopes à ultrasons                       | 1002580   |
| 2      | Sonde à ultrasons 1 MHz                      | 1002581   |
| 1      | Jeu « Ultrasons dans des corps solides »     | 1002584   |
| 1      | Plaque d'aluminium avec graduation angulaire | 1002585   |
| 1      | Jeu de 3 cylindres                           | 1002588   |
| 1      | Gel de branchement pour ultrasons            | 1008575   |

**GENERALITES**

Le son ne se propage dans les gaz et les liquides que sous forme d'ondes longitudinales. La pression oscille alors autour d'une valeur d'équilibre et engendre des zones oscillantes de densification et de raréfaction. Dans les corps solides, le son pénètre également sous forme d'ondes transversales où la tension de cisaillement oscille. Ces ondes peuvent se propager dans un corps solide, car les forces de poussée élastique nécessaires à leur transmission y sont présentes.

Les ondes longitudinales et les ondes transversales présentent des vitesses du son divergentes. Elles dépendent de la densité  $\rho$  et des constantes élastiques du corps solide. La vitesse du son de l'onde longitudinale étant

$$(1) \quad c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

$E$ : Module d'élasticité,  $\mu$ : Coefficient de Poisson

supérieur à l'onde transversale

$$(2) \quad c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$G$ : Module de cisaillement

**2**

Le module d'élasticité  $E$  et le module de cisaillement  $G$  d'un corps solide sont en relation l'un avec l'autre par le coefficient de Poisson  $\mu$  :

$$(3) \quad \frac{E}{G} = 2 \cdot (1 + \mu)$$

Il est donc possible de calculer toutes les trois forces élastiques si les deux vitesses du son  $c_L$  et  $c_T$  sont connues.

Dans cet essai expérimental, nous mesurerons d'abord les temps de propagation  $t$  nécessaires à la transmission d'un signal ultrasonique de 1 MHz dans trois cylindres en polyméthacrylate de méthyle de longueur différente  $s$  ; ces temps seront ensuite portés dans un diagramme  $s-t$  (voir l'illustration 1). La vitesse longitudinale du son dans le polyméthacrylate de méthyle se calculera à partir de la droite adaptée aux points de mesure. Un bac rempli d'eau sera ensuite placé dans le trajet des rayons, puis le temps de transmission sera mesuré. Ce temps sera encore diminué en plaçant une mince plaque plane parallèle en polyméthacrylate de méthyle ou en aluminium dans le trajet des rayons, le son se propageant plus rapidement dans le matériau de la plaque que dans l'eau. De manière plus précise, nous mesurerons alors, derrière le bac d'eau, deux signaux ultrasoniques séparés qui résultent des différences existant entre les temps de propagation de la vitesse longitudinale et de la vitesse transversale du son dans le corps solide (cf. l'illustration 2). Si la plaque se trouve sous un angle  $\alpha$  oblique par rapport au rayon incident, ce dernier sera scindé en deux faisceaux partiels sous les angles  $\beta_L$  et  $\beta_T$ , conformément à la loi de Snell-Descartes, (cf. l'illustration 3).

$$(4) \quad \frac{c}{\sin \alpha} = \frac{c_L}{\sin \beta_L} = \frac{c_T}{\sin \beta_T}$$

$c$ : Vitesse du son dans l'eau

Étant donné que les deux vitesses du son  $c_L$  et  $c_T$  dans le corps solide sont supérieures à la vitesse du son  $c$  dans l'eau, le phénomène de la réflexion totale se manifestera alors – séparément pour les ondes longitudinales et transversales – c'est à dire que les signaux transmis disparaissent complètement. Il est possible de calculer les vitesses du son correspondantes à partir des deux angles critiques  $\alpha_L$  pour les ondes longitudinales et  $\alpha_T$  pour les ondes transversales :

$$(5) \quad c_L = \frac{c}{\sin \alpha_L} \quad \text{et} \quad c_T = \frac{c}{\sin \alpha_T}$$

**EVALUATION**

- Dans le diagramme  $s-t$ , les points de mesure obtenus dans la première partie à partir des mesures des temps de propagation ne se trouvent pas sur une droite d'origine, les temps de propagation du signal étant systématiquement englobés à ces mesures par la couche d'adaptation et de protection du transducteur ultrasonore.
- L'équation de détermination du coefficient de Poisson  $\mu$  se calculera à partir des équations 1 à 3

$$\mu = \frac{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{c_L}{c_T}\right)^2 - 1}{\left(\frac{c_L}{c_T}\right)^2 - 1}$$

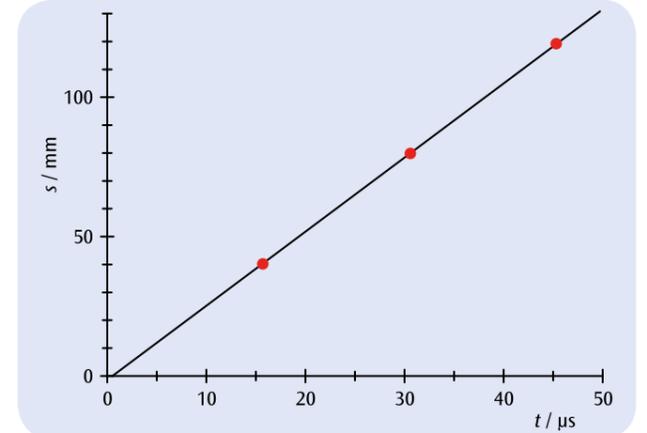


Fig. 1 Diagramme  $s-t$  du signal ultrasonique dans le polyacrylique

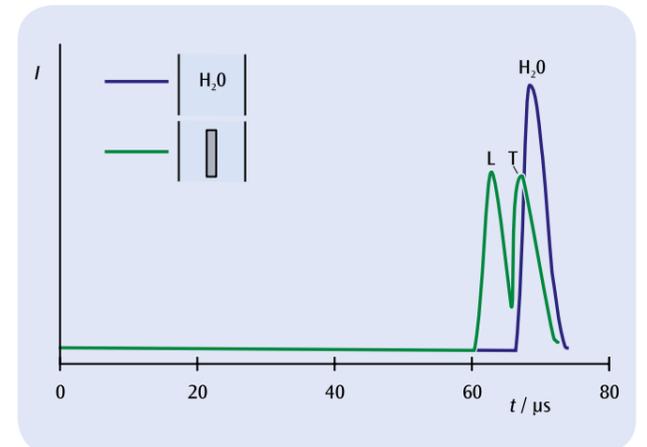


Fig. 2 Signal ultrasonique après la transmission dans le bac d'eau (bleu : sans plaque à faces parallèles, vert : avec plaque à faces parallèles)

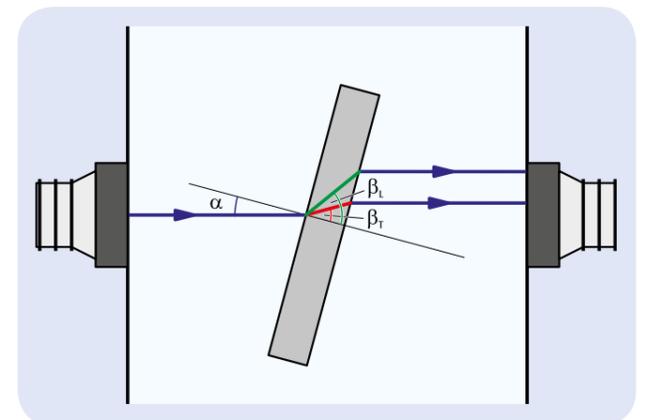


Fig. 3 Ensemble de mesures permettant de déterminer la vitesse longitudinale et la vitesse transversale du son dans un corps solide à partir des angles critiques de la réflexion totale



EXERCICES

- Observation de la figure de diffraction à fréquence d'ultrason constante pour deux longueurs d'onde lumineuse différentes.
- Observation de la figure de diffraction pour différentes fréquences d'ultrason comprises entre 1 et 12 MHz.
- Définitions de la longueur d'onde sonore et de la vitesse du son.

OBJECTIF

Détermination de la vitesse d'ondes ultrasonores dans les liquides

RESUME

Les variations de densité périodiques d'une onde ultrasonore stationnaire traversant un liquide sont utilisées comme réseau optique pour la diffraction d'un rayon de lumière monochromatique parallèle qui se propage verticalement par rapport à l'onde ultrasonore. En se basant sur la longueur connue de l'onde lumineuse, la figure de diffraction permet de calculer la longueur de l'onde sonore qui traverse le liquide et d'utiliser cette dernière pour calculer la vitesse sonore.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                                      | Référence |
|--------|---|-----------|
| 1      | Générateur d'ultrasons cw avec sonde          | 1002576   |
| 1      | Éprouvette, complète                          | 1002578   |
| 1      | Diode laser pour l'effet Lucas-Biquard, rouge | 1002577   |
| 1      | Diode laser pour l'effet Lucas-Biquard, vert  | 1002579   |
| 1      | Double mètre à ruban de poche                 | 1002603   |
| 1      | Gel de branchement pour ultrasons             | 1008575   |

GENERALITES

La diffraction de la lumière par les ultrasons dans un liquide a été prévue dès 1922 par Brillouin et mise expérimentalement en évidence en 1932 par Debye et Sears et par Lucas et Biquard. Elle repose sur la variation périodique de l'indice de réfraction dans le liquide provoquée par une onde ultrasonore. Sur une onde lumineuse passant simultanément à la verticale, cette disposition fait l'effet d'un réseau de phase qui se déplace à la vitesse du son. La constante du réseau correspond à la longueur d'onde des ultrasons et dépend par conséquent de la fréquence de ces derniers et de la vitesse sonore du fluide traversé par la lumière. Le mouvement du réseau de phase est négligeable s'il est observé sur un écran très éloigné.

Au cours de l'expérience, un transducteur module des ultrasons à des fréquences comprises entre 1 et 12 MHz dans le fluide d'essai. Un faisceau lumineux monochromatique parallèle traverse le liquide dans le sens horizontal en même temps qu'il est diffracté par le réseau de phase. La figure de diffraction contient plusieurs maxima de diffraction situés à intervalles réguliers les uns des autres.

Pour l'angle  $\alpha_k$  du maximum de diffraction du  $k$ -ème ordre, on a

$$(1) \quad \tan \alpha_k = k \cdot \frac{\lambda_L}{\lambda_S}$$

$\lambda_L$ : Longueur de l'onde lumineuse,  $\lambda_S$ : Longueur de l'onde sonore

La longueur de l'onde sonore  $\lambda_S$  peut donc être définie à partir des intervalles entre les maxima de diffraction. Par ailleurs, suivant

$$(2) \quad c = f \cdot \lambda_S$$

on peut calculer, la vitesse sonore  $c$  du fluide traversé, étant donné que les fréquences  $f$  des ondes sonores sont elles aussi connues.

EVALUATION

On mesure la distance  $s$  entre le transducteur d'ultrasons et la figure de diffraction ainsi que l'écart  $x_{2k}$  entre le  $-k$ -ème et le  $+k$ -ème maximum de diffraction. Les deux valeurs sont intégrées dans le calcul de l'angle  $\alpha_k$  pour le maximum de diffraction de  $k$ -ème ordre.

$$\tan \alpha_k = \frac{x_{2k}}{2 \cdot s}$$

L'équation à une inconnue de la longueur de l'onde sonore  $\lambda_S$  est ainsi

$$\lambda_S = \frac{2 \cdot k \cdot s}{x_{2k}} \cdot \lambda_L$$

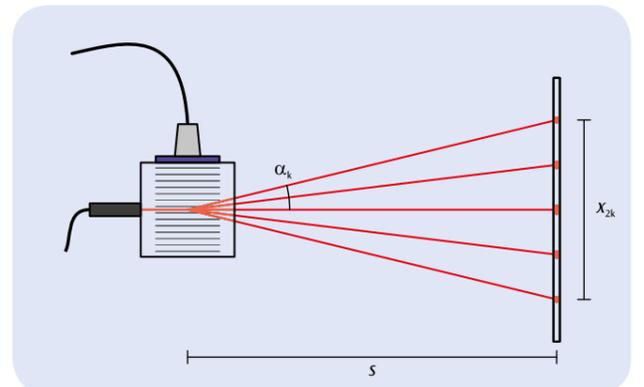


Fig. 1 Représentation schématique de la diffraction de la lumière sur un réseau de phase produit par des ultrasons traversant un liquide (effet de Lucas-Biquard)

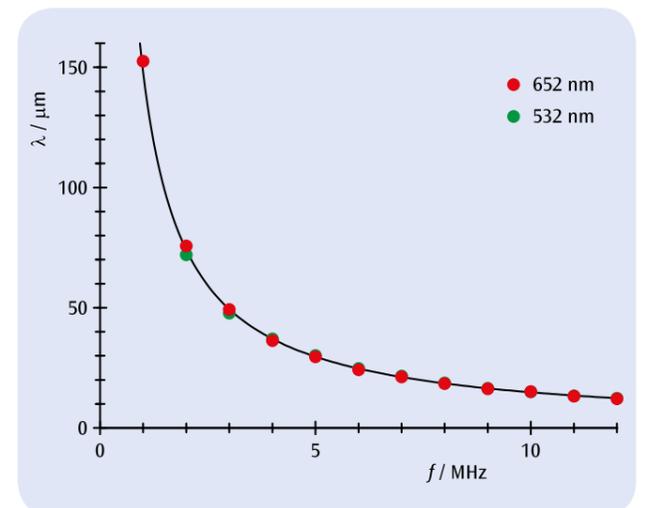


Fig. 2 Longueur de l'onde sonore  $\lambda_S$  dans l'eau en fonction de la fréquence  $f$



## EXERCICES

- Mesurer les durées de chute d'une bille dans une solution aqueuse de glycérine en fonction de la température.
- Déterminer la viscosité dynamique et comparer avec les données bibliographiques.
- Comparer la dépendance de la viscosité dynamique vis-à-vis de la température à l'aide de l'équation d'Arrhénius et Andrade et déterminer l'énergie d'activation.

## OBJECTIF

Déterminer la viscosité dynamique d'une solution aqueuse de glycérine

## RESUME

La viscosité dynamique, c'est-à-dire le facteur de proportionnalité entre le gradient de vitesse et la contrainte de cisaillement dans un liquide, caractérise la ténacité d'un liquide. Elle peut être mesurée avec le viscosimètre Höppler à chute de bille. Un thermostat à circulation permet également d'effectuer des mesures en fonction de la température. Dans l'expérience, ces mesures sont réalisées sur une solution aqueuse de glycérine. La dépendance de la viscosité vis-à-vis de la température peut être décrite avec l'équation d'Arrhénius et Andrade.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre                      | Appareil   | Référence  |
|-----------------------------|--|------------|
| 1                           | Viscosimètre à chute de bille                          | 1012827    |
| 1                           | Chronomètre numérique                                  | 1002811    |
| 1                           | Bains thermostatiques et circulation (230 V, 50/60 Hz) | 1008654 ou |
|                             | Bains thermostatiques et circulation (115 V, 50/60 Hz) | 1008653    |
| 2                           | Tuyau flexible en silicone 6 mm                        | 1002622    |
| 1                           | Glycérine, 85 %, 250 ml                                | 1007027    |
| 1                           | Entonnoir  | 1003568    |
| <b>En plus recommandé :</b> |  |            |
| 1                           | Jeu de 10 béchers, forme basse                         | 1002872    |
| 2                           | Cylindre de mesure, 100 ml                             | 1002870    |
|                             | Eau distillée, 5 l                                     |            |

# 2

## GENERALITES

La ténacité d'un liquide résulte de la liaison réciproque des particules de liquide entre elles. Plus cette liaison augmente, plus la mobilité des particules diminue. La formation d'un gradient de vitesse dans un profil d'écoulement nécessite alors une contrainte de cisaillement plus élevée. Décrivant la ténacité du liquide, le facteur de proportionnalité entre le gradient de vitesse et la contrainte de cisaillement est une grandeur appelée « viscosité dynamique ». Les liquides dont la viscosité dynamique ne dépend pas de la contrainte de cisaillement sont appelés « liquides de Newton ».

La viscosité dynamique  $\eta$  de la plupart des liquides diminue au fur et à mesure que la température augmente. Cette diminution peut souvent être décrite avec l'équation d'Arrhénius-Andrade.

$$(1) \quad \eta = \eta_0 \cdot \exp\left(\frac{E_A}{R \cdot T}\right)$$

$E_A$  : énergie d'activation des particules de liquide  
 $T$  : température absolue

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

Pour mesurer la viscosité dynamique, on observe souvent une bille qui, sous l'effet de la gravitation, descend dans le liquide. Sa chute est freinée par la force de frottement de Stokes

$$(2) \quad F_1 = \eta \cdot 6\pi \cdot r \cdot v$$

$r$  : rayon de la bille

C'est pourquoi elle diminue à vitesse constante  $v$ . L'influence de la force gravitationnelle est réduite par la poussée de la bille dans le liquide :

$$(3) \quad F_2 = \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot (\rho_0 - \rho) \cdot g$$

$\rho_0$  : densité de la bille  
 $\rho$  : densité du liquide étudié  
 $g$  : accélération de la pesanteur

Il résulte de l'équilibre entre les forces  $F_1$  et  $F_2$  :

$$(4) \quad \eta = \frac{2}{9} \cdot r^2 \cdot g \cdot (\rho_0 - \rho) \cdot \frac{t}{s}$$

$s$  : parcours de mesure

$t$  : temps de chute pour le parcours de mesure

En réalité, l'équation (2) décrit la force de frottement exercée sur la bille uniquement pour les cas où le diamètre du tube de mesure rempli du liquide d'essai est sensiblement supérieur à celui de la bille. Toutefois, cela exigerait une grande quantité de liquide d'essai. Dans la pratique, pour mesurer la viscosité, on utilise un viscosimètre Höppler à chute de bille avec un tube de mesure incliné par rapport à la verticale, dans lequel la bille glisse et roule sur la paroi. Dans ce cas, l'équation pour déterminer la viscosité dynamique est la suivante :

$$(5) \quad \eta = t \cdot (\rho_0 - \rho) \cdot K$$

Le facteur de calibration  $K$  est indiqué par le fabricant pour chaque bille livrée. Pour éviter d'éventuelles erreurs systématiques, on peut tourner le tube de mesure et mesurer le temps de chute pour le chemin retour. Dans l'expérience, on étudie de la glycérine normale qui, regardée de plus près, est une solution aqueuse contenant une part de glycérine d'env. 85 %. On utilise délibérément la dilution, car la viscosité de la glycérine pure est

trop élevée pour de nombreuses applications. La viscosité est mesurée en fonction de la température. À cet effet, le viscosimètre à chute de bille est relié à un thermostat de circulation. La dilution ciblée de la solution de glycérine avec de l'eau distillée permet également d'étudier la dépendance de la concentration vis-à-vis de la viscosité.

## EVALUATION

Une comparaison de la viscosité mesurée avec les données bibliographiques confirme les indications du fabricant sur la concentration. On peut réécrire l'équation (1) de la manière suivante :

$$\ln \eta = \ln \eta_0 + E_A \cdot \frac{1}{R \cdot T}$$

C'est pourquoi on applique  $y = \ln \eta$  à  $x = \frac{1}{R \cdot T}$  et on détermine l'énergie

d'activation  $E_A$  à partir de la pente de la droite qui en résulte.

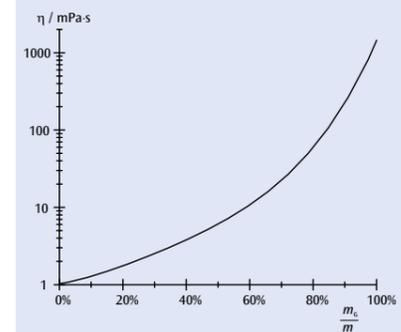


Fig. 1 Viscosité dynamique d'une solution aqueuse de glycérine à 20 °C en fonction de la concentration de masse (données bibliographiques interpolées)

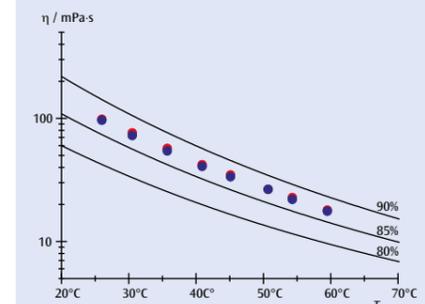


Fig. 2 Viscosité dynamique d'une solution aqueuse de glycérine à 20 °C en fonction de la température (comparaison entre les données de mesure et les données bibliographiques interpolées)

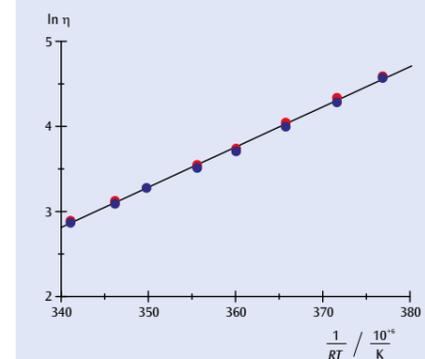


Fig. 3 Représentation pour confirmer l'équation d'Arrhénius et Andrade et déterminer l'énergie d'activation ( $E_A = 47 \text{ kJ/mol}$ )

**OBJECTIF**

Mesure de la tension superficielle selon la méthode d'adhérence

**RESUME**

Pour déterminer la tension superficielle d'un liquide, une lame est plongée à l'horizontale dans ce liquide, puis tirée lentement vers le haut pour l'en extraire tout en mesurant la force de traction. La lamelle qui se forme sur la lame rompt dès qu'une force caractéristique est dépassée. Cette force ainsi que la longueur de la lame permettent de calculer la tension superficielle.


**EXERCICES**

- Production d'une lamelle de liquide entre une lame de forme circulaire et la surface du liquide en extrayant lentement la lame du bain de liquide.
- Mesure de la force de traction peu avant la rupture de la lamelle de liquide.
- Détermination de la tension superficielle à partir de la force de traction mesurée.

**2**
**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre | Appareil                             | Référence |
|--------|--------------------------------------|-----------|
| 1      | Anneau pour la tension superficielle | 1000797   |
| 1      | Dynamomètre de précision 0,1 N       | 1003102   |
| 1      | Bécher, de 600 mL                    | 1002872   |
| 1      | Laborboy II                          | 1002941   |
| 1      | Socle pour statif, trépied, 150 mm   | 1002835   |
| 1      | Tige statif, 470 mm                  | 1002934   |
| 1      | Noix de serrage avec crochet         | 1002828   |
| 1      | Pied à coulisse, 150 mm              | 1002601   |

**GENERALITES**

La tension superficielle ou interfaciale d'un liquide est une propriété de la surface de séparation entre le liquide et l'air avoisinant. Elle résulte du fait que les forces des molécules voisines de chaque molécule de liquide située à la surface ne peuvent s'exercer que d'un seul côté sur celle-ci, alors qu'elles s'exercent de tous les côtés sur une molécule qui se trouve dans le bain de liquide (cf. figure 1). La molécule située à la surface subit donc une force verticale par rapport à la surface, à l'intérieur du bain de liquide. Pour amener d'autres molécules à la surface afin d'agrandir celle-ci, un apport d'énergie est nécessaire.

On désigne le quotient

$$(1) \quad \sigma = \frac{\Delta E}{\Delta A}$$

tiré de l'énergie ajoutée à température constante  $E$  et de la modification  $A$  de la surface comme tension superficielle ou encore densité de flux énergétique de la surface.

Pour mieux illustrer cette définition, on peut par exemple observer une lame de forme circulaire, dans un premier temps entièrement plongée dans le liquide. Si l'on retire progressivement la lame du bain de liquide, une lamelle de liquide remonte sur le bord inférieur de la lame (cf. figure 2). La surface de cette lamelle sur les côtés extérieur et intérieur de la lame varie dans l'ensemble de

$$(2) \quad \Delta A = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \Delta x$$

$R$ : Rayon de l'anneau

si la lame est retirée de la distance supplémentaire de  $x$ . Une force

$$(3) \quad F_0 = \frac{\Delta E}{\Delta x}$$

est nécessaire. Si la force  $F_0$  est dépassée lorsque la lame est retirée du liquide, la lamelle de liquide se détache.

Dans le cadre de l'expérience, un anneau métallique possédant un bord inférieur vif est suspendu à l'horizontale à un dynamomètre de précision. L'anneau métallique est dans un premier temps entièrement plongé dans le liquide d'essai (de l'eau par ex.) et ensuite retiré progressivement du bain de liquide dans un mouvement ascendant. La lamelle de liquide rompt si la force de traction  $F$  dépasse la valeur limite  $F_0$ .

**EVALUATION**

De (1), (2) et (3), on déduit

$$F_0 = \frac{\Delta E}{\Delta x} = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \sigma$$

L'équation conditionnelle est donc

$$\sigma = \frac{F_0}{4 \cdot \pi \cdot R}$$

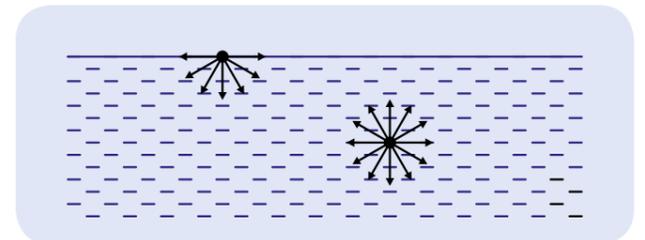


Fig. 1 Forces d'interaction exercées sur une molécule de liquide à la surface et sur une molécule située à l'intérieur du liquide par les molécules voisines

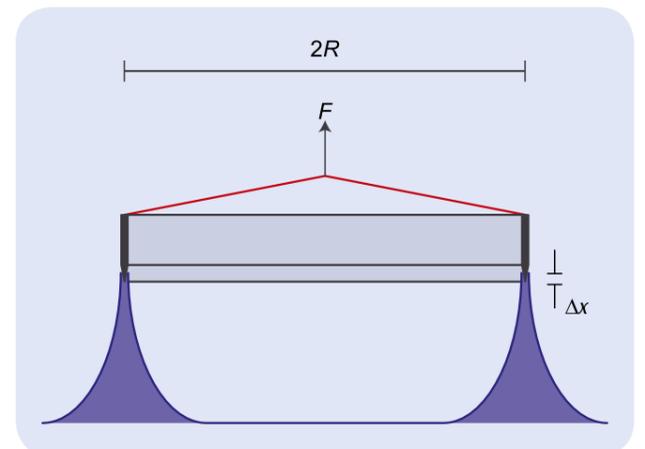


Fig. 2 Représentation schématique



## EXERCICES

- Mesurer la dilatation thermique d'un tube en laiton, d'un tube en acier et d'un tube en verre.
- Déterminer les coefficients de dilatation linéaires de ces matériaux et les comparer avec les valeurs théoriques.

## OBJECTIF

Déterminer les coefficients de dilatation du laiton, de l'acier et du verre

## RESUME

Généralement, lorsqu'on chauffe fortement des corps solides, ils se dilatent plus ou moins. Dans l'expérience, nous allons faire passer de l'eau chaude à travers des tubes fins en laiton, en acier et en verre. La mesure de la dilatation longitudinale s'effectue avec un comparateur. La modification de longueur permet de déterminer le coefficient de dilatation linéaire pour les trois matériaux.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil   | Référence  |
|--------|--|------------|
| 1      | Appareil de dilataion thermique D                      | 1002977    |
| 1      | Bains thermostatiques et circulation (230 V, 50/60 Hz) | 1008654 ou |
|        | Bains thermostatiques et circulation (115 V, 50/60 Hz) | 1008653    |
| 1      | Comparateur avec adaptateur                            | 1012862    |
| 2      | Tuyau flexible en silicone 6 mm                        | 1002622    |

# 1

## NOTE

S'il suffit d'étudier la différence de longueur entre la température ambiante et la température de la vapeur d'eau, on peut remplacer le thermostat d'immersion / de circulation par un générateur de vapeur. Nous proposons la liste d'accessoires correspondante sous le numéro UE2010135 (cf. Fig. 3).

## GENERALITES

Dans un corps solide, chaque atome oscille autour de sa position d'équilibre. L'oscillation n'est pas harmonique, car l'énergie potentielle augmente plus fortement lorsque deux atomes en position d'équilibre s'approchent que s'ils s'éloignent l'un de l'autre. Lorsque la température, et par conséquent l'énergie d'oscillation, est plus élevée, les atomes oscillent de manière à ce que la distance moyenne entre deux atomes voisins est plus importante que la distance d'équilibre. Cet effet augmente avec la température, aussi le corps solide se dilate-t-il toujours plus au fur et à mesure que la température augmente. Dans ce contexte, il est usuel de considérer des modifications de longueur relatives et d'en calculer les modifications de volume.

Le coefficient de dilatation linéaire est défini par

$$(1) \quad \alpha = \frac{1}{L(\vartheta)} \cdot \frac{dL}{d\vartheta}$$

L: longueur  
 $\vartheta$ : température en °C

Il dépend fortement du matériau et ne dépend généralement que peu de la température. Aussi

$$(2) \quad L(\vartheta) = L_0 \cdot \exp(\alpha \cdot \vartheta)$$

$$L_0 = L(0 \text{ °C})$$

ou à des températures pas trop élevées

$$(3) \quad L(\vartheta) = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \vartheta)$$

Dans l'expérience, nous allons effectuer des mesures sur des tubes fins en acier, en laiton et en verre qui, pour être réchauffés, sont traversés par de l'eau chaude. Un thermostat de circulation garantit une température d'eau réglable constante. Comme les tubes sont fixés d'un côté à l'appareil d'extension longitudinale, un comparateur permet de lire à l'autre extrémité la modification de longueur en fonction de la température ambiante (température de référence).

## EVALUATION

Dans la plage de température étudiée,  $\alpha \cdot \vartheta \ll 1$ . L'équation (3) peut donc être modifiée

$$\Delta L = L(\vartheta_1) \cdot \alpha \cdot \Delta\vartheta \text{ avec } \Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1, L(\vartheta_1) = 600 \text{ mm}$$

Les coefficients de dilatation linéaires recherchés peuvent être déterminés dans la Fig. 1 à partir de la pente des droites passant par l'origine. Par ailleurs, la dérivation de l'équation (1) est devenue superflue, même si l'on considère des températures élevées. Dans ce cas,  $\alpha$  s'avère ne pas être constant, mais dépendant de la température. Considéré de plus près, c'est justement le cas dans la plage de température étudiée. Comme les modifications de longueur sont mesurées avec une résolution de 0,01 mm, une analyse détaillée des données montre, notamment pour le laiton, que les valeurs de mesure ne sont pas tout à fait linéaires et que le coefficient de dilatation augmente légèrement au fur et à mesure que la température augmente.

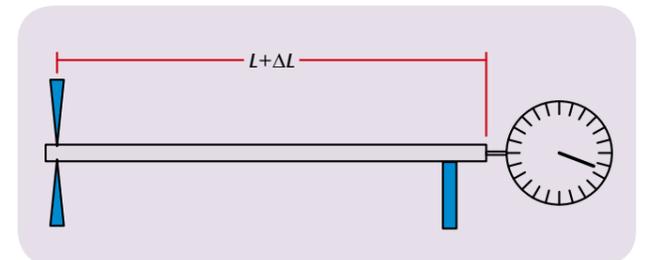


Fig. 1 Représentation schématique du montage expérimental de mesure

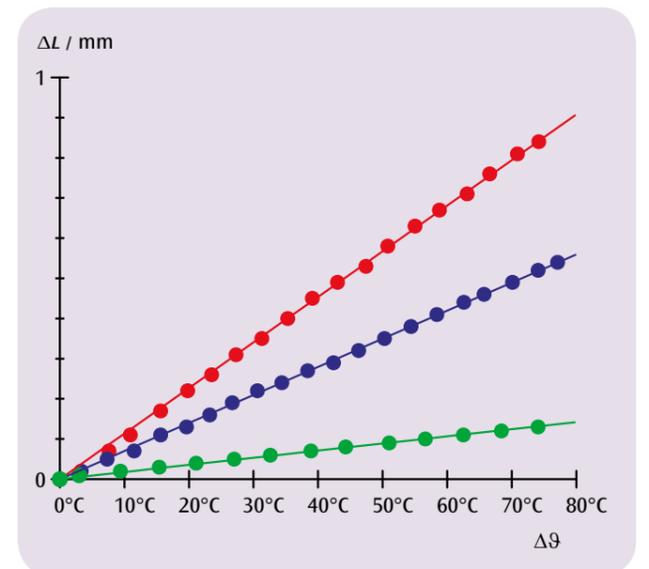
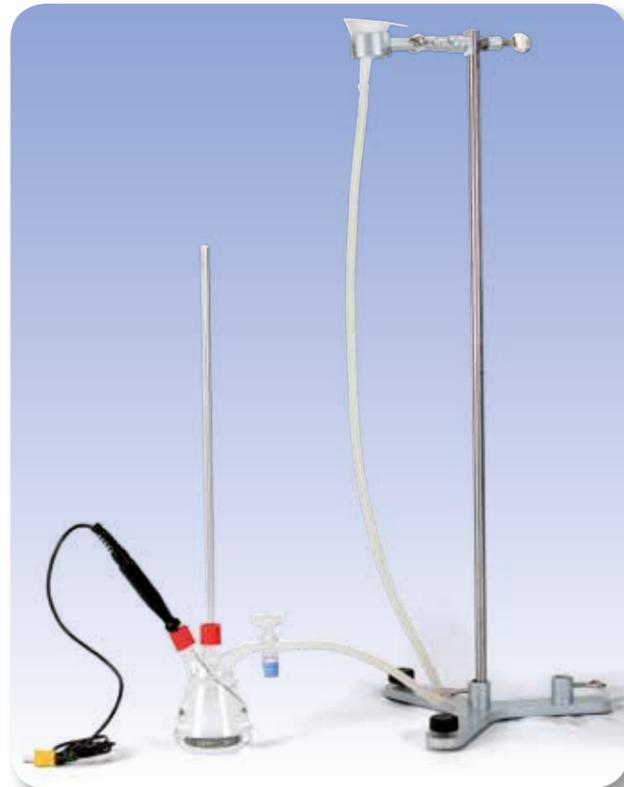


Fig. 2 Modification de longueur du laiton (rouge), de l'acier (bleu) et du verre (vert) en fonction de la différence de température



Fig. 3 Montage avec un générateur de vapeur



## EXERCICES

- Mesure de la dilatation thermique de l'eau à des températures entre 0°C et 15°C.
- Démonstration de l'anomalie thermique.
- Détermination de la température de l'eau à son maximum de densité

## OBJECTIF

Détermination de la température de la densité maximum de l'eau

## RESUME

Lorsque la température est augmentée entre 0°C et 4°C, le volume de l'eau diminue dans un premier temps, puis augmente quand les températures sont plus élevées. La densité de l'eau atteint sa valeur maximale à environ 4°C.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre                      | Appareil   | Référence |
|-----------------------------|--|-----------|
| 1                           | Dispositif de mesure de l'anomalie de l'eau      | 1002889   |
| 1                           | Cuve en plastique                                | 4000036   |
| 1                           | Agitateur magnétique                             | 1002808   |
| 1                           | Thermomètre numérique, 1 canal                   | 1002793   |
| 1                           | Sonde à immersion NiCr-Ni type K, - 65°C – 550°C | 1002804   |
| <b>En plus recommandé :</b> |  |           |
| 1                           | Entonnoir  | 1003568   |
| 1                           | Tuyau flexible en silicone 6 mm                  | 1002622   |
| 1                           | Tige statif, 470 mm                              | 1002934   |
| 1                           | Pince avec noix                                  | 1002829   |
| 1                           | Socle pour statif, trépied, 150 mm               | 1002835   |

# 1

## GENERALITES

Comparée à la plupart des autres matières, l'eau présente une particularité. Jusqu'à une température d'environ 4°C, elle se contracte au réchauffement et ne se dilate qu'à des températures plus élevées. Comme la densité correspond à l'inverse du volume d'une quantité de matière, l'eau atteint donc son maximum de densité à environ 4°C.

Au cours de l'expérience, la dilatation de l'eau est mesurée dans un récipient avec colonne montante. On mesure la hauteur de montée  $h$  en fonction de la température de l'eau. Si l'on néglige que le récipient en verre se dilate également en cas de réchauffement, le volume total de l'eau dans le récipient et la colonne résulte de l'équation suivante :

$$(1) \quad V(\vartheta) = V_0 + \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h(\vartheta)$$

$d$  : Diamètre intérieur de la colonne,  $V_0$  : Volume du récipient

Si l'on tient compte de la dilatation du récipient, l'équation (1) est alors modifiée :

$$(2) \quad V(\vartheta) = V_0 \cdot (1 + 3 \cdot \alpha \cdot \vartheta) + \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h(\vartheta)$$

$= 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  : Coefficient de dilatation linéaire du verre

## EVALUATION

Pour la densité  $\rho$  de l'eau, il résulte des équations (1) et (2)

$$\frac{\rho(\vartheta)}{\rho(0^\circ\text{C})} = \frac{V_0 + \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h(0^\circ\text{C})}{V_0 \cdot (1 + 3 \cdot \alpha \cdot \vartheta) + \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h(\vartheta)}$$

Selon le tableau, le maximum de ce rapport se situe à  $\vartheta = 3,9^\circ\text{C}$ .

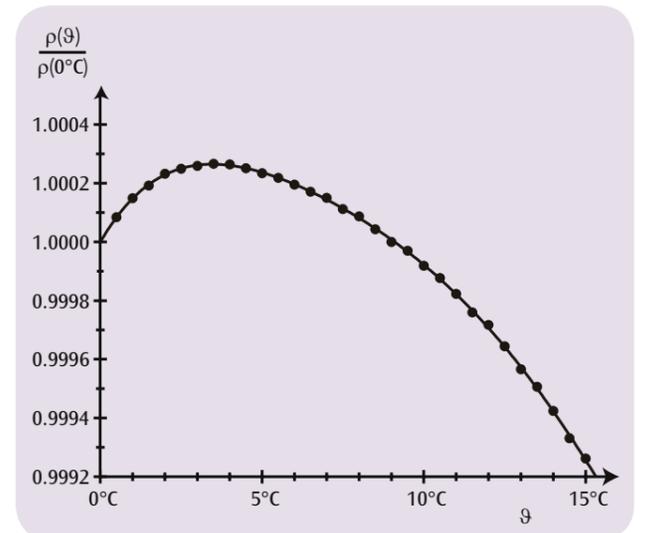


Fig. 1 Densité relative de l'eau en fonction de la température

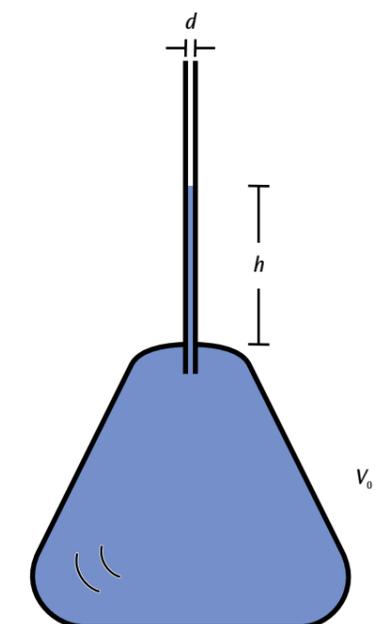


Fig. 2 Récipient avec colonne montante


**OBJECTIF**

Mesurer la conduction thermique dans des barres métalliques

**EXERCICES**

- Mesurer la courbe de température le long de barres métalliques chauffées d'un côté et refroidies de l'autre, à l'état non stationnaire et stationnaire.
- Mesurer le courant thermique à l'état stationnaire.
- Déterminer la conductivité thermique du matériau de la barre.

**RESUME**

En conduction thermique, de la chaleur est transférée d'une zone chaude vers une zone froide par l'interaction entre les atomes ou molécules voisins, sans que ceux-ci ne soient eux-mêmes transportés. Dans une barre cylindrique en métal, dont les extrémités sont maintenues à différentes températures, un gradient de température se stabilise après un certain temps le long de la barre, de sorte que la température diminue régulièrement vers l'extrémité froide et que le courant thermique qui s'écoule est constant. La transition de l'état non stationnaire à l'état stationnaire est relevée au moyen de plusieurs séries de mesures, au cours desquelles la température est déterminée à chaque fois aux points de mesure. Les barres métalliques sont chauffées électriquement, aussi le courant thermique à l'état stationnaire peut-il être déterminé à partir de la puissance électrique.

**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Kit d'appareils sur la conduction thermique         | 1017329    |
| 1      | Barre conductrice de chaleur (Al)                   | 1017331    |
| 1      | Barre conductrice de chaleur (Cu)                   | 1017330    |
| 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    |
| 1      | Thermomètre de poche numérique ultra-rapide         | 1002803    |
| 1      | Sonde à immersion NiCr-Ni type K, - 65°C – 550°C    | 1002804    |
| 1      | Paire de cordons de sécurité, 75cm, rouge/bleu      | 1017718    |
| 1      | Jeu de 10 béchers, forme basse                      | 1002872    |

**1**
**GENERALITES**

La chaleur peut être transmise d'une zone chaude à une zone froide par conduction thermique, rayonnement thermique et convection. En conduction thermique, ce transport d'énergie s'effectue par l'interaction entre les atomes ou molécules voisins, sans que ceux-ci ne soient eux-mêmes transportés. En cas de réchauffement par ex. d'une barre métallique, les atomes situés à l'extrémité chaude oscillent plus fortement, c'est-à-dire avec plus d'énergie, qu'à l'extrémité froide. L'énergie est cédée aux atomes voisins par des chocs avec ceux-ci et transmise ainsi à travers la barre. Les métaux sont des conducteurs thermiques particulièrement bons, car ils profitent en plus des chocs entre des électrons libres et les atomes.

Dans une barre cylindrique de section de surface  $A$ , dont les extrémités sont maintenues à différentes températures, un gradient de température se stabilise après un certain temps le long de la barre, de sorte que la température  $T$  diminue régulièrement vers l'extrémité froide. Pendant un temps  $dt$ , une quantité d'énergie  $dQ$  traverse la section de la barre et il se forme un courant thermique constant  $P_Q$  :

$$(1) \quad P_Q = \frac{dQ}{dt} = \lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

$P_Q$  : courant thermique (mesuré en watts)

$A$  : surface de section de la barre

$\lambda$  : conductivité thermique du matériau de la barre

$T$  : température,  $x$  : coordonnées le long de la barre

Avant que le gradient de température constant ne soit atteint, la barre, au moment  $t$ , présente une répartition thermique  $T(x,t)$ , qui s'approche progressivement de l'état stationnaire. L'équation différentielle est appliquée :

$$(2) \quad \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x,t) - c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0$$

$c$  : chaleur spécifique et  $\rho$  : densité du matériau de la barre

Dans le cas stationnaire, il y a concordance avec l'équation (1)

$$(3) \quad \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0 \quad \text{et} \quad \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}(x,t) = \text{const.} = \frac{P_Q}{A}$$

Dans l'expérience, la barre est chauffée électriquement à une extrémité. Une source de chaleur à régulation électronique alimente la barre de conduction avec un courant thermique qui peut être déterminé comme puissance électrique

$$(4) \quad P_{el} = U \cdot I$$

par la mesure de la tension de chauffage  $U$  et du courant de chauffage  $I$ . La régulation électronique du courant garantit que l'extrémité de la barre atteint très rapidement une température d'environ 90 °C, qui sera ensuite maintenue constante.

La chaleur à l'autre extrémité de la barre est évacuée via les lamelles de refroidissement dans de l'eau glacée ou tout simplement dans de l'eau à température ambiante. La puissance thermique cédée peut donc être déterminée par voie calorimétrique.

Une manchette isolante réduit le dégagement de chaleur de la barre de conduction à l'environnement et améliore la linéarité du profil de température à l'état stationnaire. Un thermomètre électronique ultrarapide mesure les températures aux points de mesure prévus le long de la barre. Vous disposez d'une barre en cuivre et d'une barre en aluminium.

**EVALUATION**

La puissance thermique  $P_Q$  correspond à la puissance électrique  $P_{el}$ , déduction faite d'une faible perte de puissance  $P_1$  :  $P_Q = P_{el} - P_1$

$$\text{Par conséquent :} \quad \lambda = \frac{P_{el} - P_1}{A} \cdot \frac{L}{T(0) - T(L)}$$

( $L$  : écart entre les points de mesure de température choisis)

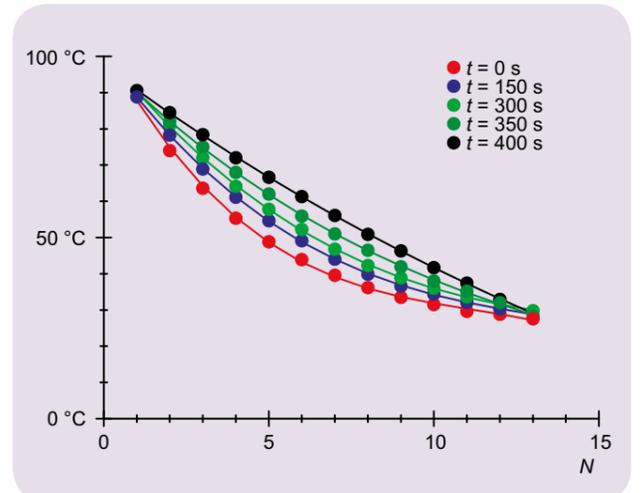


Fig. 1 Températures le long de la barre en aluminium dans cinq séries de mesures effectuées dans un écart de 150 s



## EXERCICES

- Mise en évidence du rayonnement thermique d'un cube de Leslie avec une thermopile selon Moll
- Mesure de l'intensité relative des radiations émises pour les quatre surfaces du cube en fonction de la température
- Confirmation de la corrélation de  $T^4$  avec l'intensité du rayonnement

## OBJECTIF

Mesure du rayonnement thermique d'un cube de Leslie

## RESUME

Le rayonnement émis par un corps dépend de sa température et des propriétés de sa surface. Plus exactement, la loi de Kirchhoff dit que pour une température donnée, le rayonnement émis par un corps correspond à l'énergie rayonnante qu'il est susceptible d'absorber, et qu'il correspond au rayonnement  $E_{SB}$  émis par un corps noir à cette température. L'expérience consiste à chauffer un cube de Leslie rempli d'eau chaude à une température de 100°C max., puis à mesurer l'intensité relative des radiations thermiques émises au moyen d'une thermopile selon Moll.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil   | Référence  |
|--------|--|------------|
| 1      | Cube de Leslie                                   | 1000835    |
| 1      | Support rotatif pour cube de Leslie              | 1017875    |
| 1      | Thermopile d'après Moll                          | 1000824    |
| 1      | Amplificateur de mesure (230 V, 50/60 Hz)        | 1001022 ou |
|        | Amplificateur de mesure (115 V, 50/60 Hz)        | 1001021    |
| 1      | Multimètre numérique P3340                       | 1002785    |
| 1      | Thermomètre de poche numérique ultra-rapide      | 1002803    |
| 1      | Sonde à immersion NiCr-Ni type K, - 65°C – 550°C | 1002804    |
| 1      | Paire de cordons de sécurité, 75 cm              | 1002849    |
| 1      | Cordon HF, BNC / douille 4 mm                    | 1002748    |
| 2      | Pied en tonneau, 500 g                           | 1001046    |
| 1      | Double mètre à ruban de poche                    | 1002603    |

1

## GENERALITES

Les échanges thermiques d'un corps avec son environnement s'effectuent aussi par l'émission et l'absorption d'un rayonnement thermique. Le rayonnement émis par un corps dépend de sa température et des qualités de sa surface, comme on peut le voir avec un cube de Leslie.

L'intensité des radiations émises par le corps étudié est désignée par l'émissivité  $E$ . Le pouvoir d'absorption  $A$  est le rapport entre l'intensité du rayonnement absorbé et celle du rayonnement incident. On constate alors que le coefficient d'absorption est particulièrement élevé lorsque l'émissivité l'est aussi. Plus exactement, la loi de Kirchhoff dit que pour tous les corps à une température donnée, le rayonnement émis correspond à l'énergie rayonnante susceptible d'être absorbée, et qu'il correspond à l'émissivité  $E_{SB}$  d'un corps noir à cette température.

$$(1) \quad \frac{E(T)}{A} = E_{SB}(T) = \sigma \cdot T^4$$

$\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann,  
 $T$  : température en Kelvin

En règle générale, les variations du coefficient d'absorption en fonction de la température peuvent être négligées. L'émissivité d'un corps peut donc être calculée comme suit :

$$(2) \quad E(T) = A \cdot \sigma \cdot T^4$$

Si le corps a la même température  $T_0$  que son environnement, l'intensité du rayonnement qu'il émet

$$(3) \quad E(T_0) = A \cdot \sigma \cdot T_0^4$$

est la même que celle du rayonnement qu'il absorbe de son environnement. Si sa température est plus élevée, l'intensité du rayonnement absorbé ne change pas tant que la température ambiante reste constante. Par conséquent, le débit d'énergie thermique (mesuré avec un détecteur de rayonnement) du corps étudié est de

$$(4) \quad \Delta E(T) = A \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4)$$

par unité de surface et de temps. L'expérience est réalisée avec un cube de Leslie comportant quatre surfaces radiantes différentes : blanche, noire, aluminium mat et aluminium poli. Le cube est rempli d'eau chaude et chauffé à une température d'environ 100°C, puis on mesure l'intensité relative des radiations thermiques émises au moyen d'une thermopile selon Moll. Les valeurs mesurées pour les quatre surfaces du cube sont relevées pendant tout le processus de refroidissement jusqu'à la température ambiante.

## EVALUATION

Lorsqu'on reporte les valeurs mesurées sur un diagramme en fonction de la grandeur  $x = T^4 - T_0^4$  on obtient quatre droites passant par l'origine dont les pentes correspondent aux différents coefficients d'absorption des surfaces radiantes. Dans la gamme de température étudiée – jusqu'à 100 °C –, on ne constate pas de différence notable entre la surface noire et la surface blanche, ni entre la surface mate et la surface brillante, bien que ces différences soient visibles à l'œil nu. À l'évidence, les surfaces ne diffèrent pas beaucoup les unes des autres au niveau du spectre des ondes infrarouges.

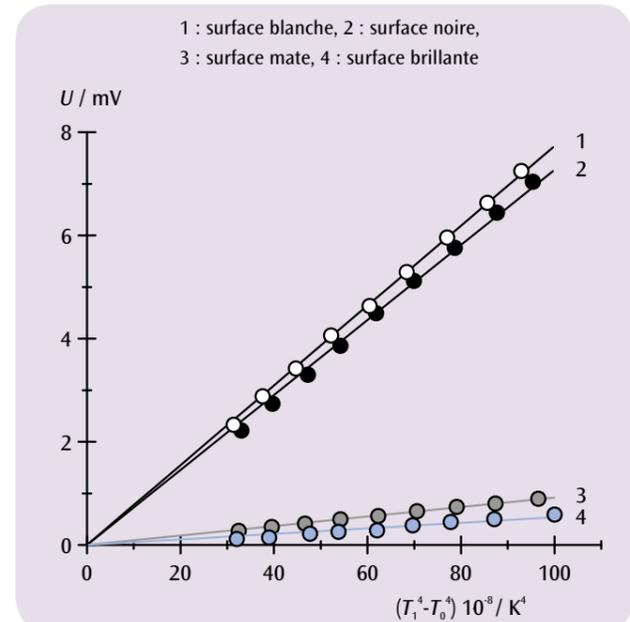


Fig. 1 Intensité des radiations thermiques émises par le cube de Leslie en fonction de  $x = T^4 - T_0^4$



## EXERCICES

- Mesure de la température du corps en aluminium en fonction du nombre de tours sous le cordon de frottement.
- Vérification de la proportionnalité entre la variation de température et le travail de frottement et confirmation du 1<sup>er</sup> principe.
- Définition de la capacité thermique spécifique de l'aluminium.

## OBJECTIF

Vérification du 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique

## RESUME

Examen de l'augmentation de l'énergie interne d'un corps en aluminium due au travail de frottement. Elle peut être constatée par le biais de l'augmentation proportionnelle de la température du corps étant donné qu'aucun changement d'état de l'unité ni aucune réaction chimique n'ont été observés. Afin d'éviter autant que possible un échange de chaleur du corps en aluminium avec l'environnement, la série de mesures est lancée à une température inférieure à la température ambiante et achevée à une température qui, de la même manière, n'est que légèrement supérieure à la température ambiante.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence |
|--------|---|-----------|
| 1      | Dispositif de mesure de l'équivalent thermique          | 1002658   |
| 1      | Multimètre numérique (pour la mesure de la température) | 1002781   |
| 1      | Paire de cordons de sécurité, 75cm, rouge/bleu          | 1017718   |

# 1

## GENERALITES

La modification  $\Delta E$  de l'énergie interne d'un système est, selon le 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique, égale à la somme du travail accompli  $\Delta W$  et de la chaleur transformée  $\Delta Q$ . La modification peut être constatée par le biais de la variation proportionnelle  $\Delta T$  de la température du système en l'absence de tout changement d'état de l'unité et de toute réaction chimique.

L'expérience a pour but d'examiner l'augmentation de l'énergie interne d'un corps en aluminium par le travail mécanique. A cet effet, un corps cylindrique est mis en rotation autour de son axe au moyen d'une manivelle et réchauffé par le frottement d'un cordon glissant sur sa surface latérale. La force de frottement  $F$  correspond au poids d'une masse suspendue à l'extrémité du cordon de frottement et maintenue en suspension par la force de frottement.

$n$  rotations du corps réalisent le travail de frottement

$$(1) \quad \Delta W_n = F \cdot \pi \cdot d \cdot n$$

$d$ : Diamètre du corps

Le travail de frottement provoque l'augmentation de la température du corps de la valeur de départ  $T_0$  à la valeur finale  $T_n$ . Parallèlement, l'énergie interne augmente de la valeur

$$(2) \quad \Delta E_n = m \cdot c_{Al} \cdot (T_n - T_0)$$

$m$ : Masse du corps  
 $c_{Al}$ : Capacité thermique spécifique de l'aluminium

Afin d'éviter autant que possible un échange de chaleur avec l'environnement, avant le début de la mesure, le corps est refroidi à une température initiale  $T_0$ , légèrement inférieure à la température ambiante. De plus, la mesure est stoppée dès qu'une température finale  $T_n$  est atteinte, celle-ci étant, de la même manière, très légèrement supérieure à la température ambiante.

On garantit ainsi que la modification de l'énergie interne concorde avec le travail réalisé. On obtient donc l'équation

$$(3) \quad \Delta E_n = \Delta W_n$$

## EVALUATION

Les équations 2 et 3 permettent de déduire l'équation

$$T_n = T_0 + \frac{1}{m \cdot c_{Al}} \cdot \Delta W_n$$

Il paraît donc logique de représenter les températures mesurées  $T_n$  en fonction du travail réalisé  $\Delta W_n$  (cf. figure 1). Les valeurs relevées à proximité de la température ambiante se situent sur une droite dont la pente permet de calculer la capacité thermique de l'aluminium. En dessous de la température ambiante, les températures mesurées augmentent plus rapidement que la pente de la droite étant donné que le corps en aluminium absorbe de la chaleur ambiante. Au-delà de la température ambiante, de la chaleur est par contre rejetée dans l'environnement ambiant.

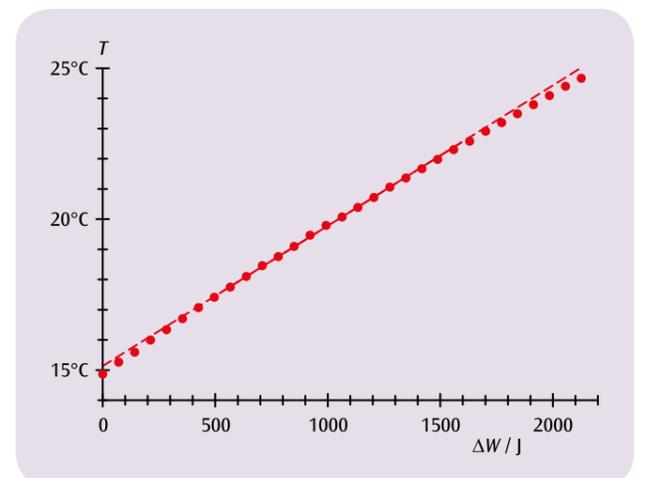


Fig. 1 Température du corps en aluminium en fonction du travail de frottement accompli



## EXERCICES

- Mesurer la température d'un calorimètre en aluminium et d'un calorimètre en cuivre en fonction du travail électrique fourni.
- Vérifier la proportionnalité entre la modification de température et le travail électrique et confirmer le 1er théorème.
- Déterminer la capacité thermique spécifique pour le cuivre et l'aluminium.

## OBJECTIF

Augmentation de l'énergie interne par le travail électrique

## RESUME

Nous allons étudier l'augmentation par le travail électrique de l'énergie interne d'un calorimètre de cuivre et d'un calorimètre d'aluminium. Si l'état de l'agrégat ne se modifie pas et qu'aucune réaction chimique ne se produit, la modification de l'énergie interne peut être relevée par le biais de l'augmentation de température du système qui lui est proportionnelle. Pour éviter un échange thermique du calorimètre avec le milieu, la série de mesures est démarrée à une température se situant légèrement au-dessous de la température ambiante et se termine à une température se situant légèrement au-dessus.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Calorimètre en cuivre   | 1002659    |
| 1      | Calorimètre en aluminium  | 1017897    |
| 1      | Palpeur de température  | 1017898    |
| 1      | Paire de câbles adaptateurs à fiche de sécurité 4 mm / fiche 2 mm | 1017899    |
| 1      | Paire de cordons de sécurité, 75cm, rouge/bleu                    | 1017718    |
| 1      | Multimètre numérique P1035  | 1002781    |
| 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    |

# 1

## GENERALITES

On peut augmenter l'énergie interne d'un système par le travail électrique à la place du travail mécanique. Dans ce cas également, la température du système présente une augmentation linéaire par rapport au travail fourni, dans la mesure où l'état de l'agrégat ne subit aucune modification et qu'aucune réaction chimique ne se produit.

Au cours de l'expérience, nous allons étudier l'augmentation par le travail électrique de l'énergie interne d'un calorimètre en cuivre et d'un calorimètre en aluminium. Elle est proportionnelle à la tension appliquée  $U$ , au courant  $I$  et au temps de mesure  $t$  :

$$(1) \quad \Delta W_e(t) = U \cdot I \cdot t$$

Par le travail électrique, la température du calorimètre est augmentée de la valeur initiale  $T_0$  à la valeur finale  $T_n$ . Aussi, l'énergie interne augmente de la valeur

$$(2) \quad \Delta E(t) = m \cdot c \cdot (T(t) - T_0)$$

$m$ : masse du calorimètre  
 $c$ : capacité thermique spécifique du matériau

Pour éviter autant que possible un échange thermique avec le milieu, le calorimètre est refroidi dès le début de la mesure à une température initiale  $T_0$  ne se situant que légèrement au-dessous de la température ambiante. La mesure est terminée dès qu'une température finale  $T_n$  est atteinte, qui ne se situe que légèrement au-dessus de la température ambiante.

Dans ces conditions, la modification de l'énergie interne coïncide au travail fourni et l'équation suivante s'applique :

$$(3) \quad \Delta E(t) = \Delta W_e(t)$$

## EVALUATION

Pour la mesure de la température  $T$ , on utilise un palpeur de température NTC et on mesure sa résistance dépendant de la température. Dans ce cas :

$$T = \frac{217}{R^{0.13}} - 151$$

Les températures ainsi déterminées sont représentées en fonction du travail électrique. La pente de la droite permet de déterminer les capacités thermiques des calorimètres et de calculer les capacités thermiques spécifiques, si la masse est connue.

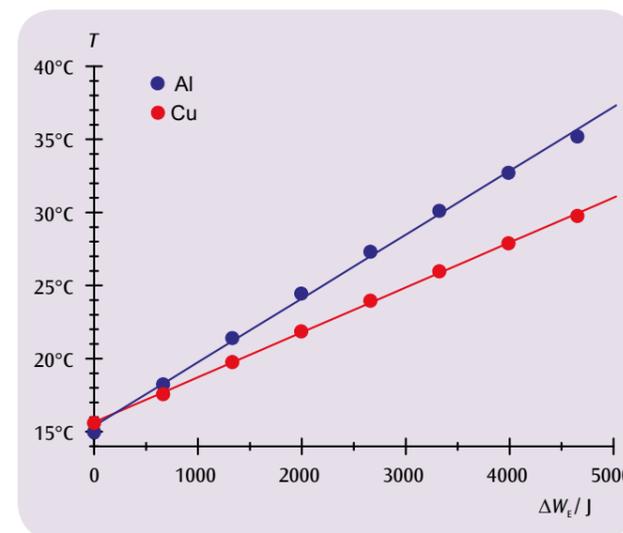


Fig. 1 Température des calorimètres en fonction du travail électrique

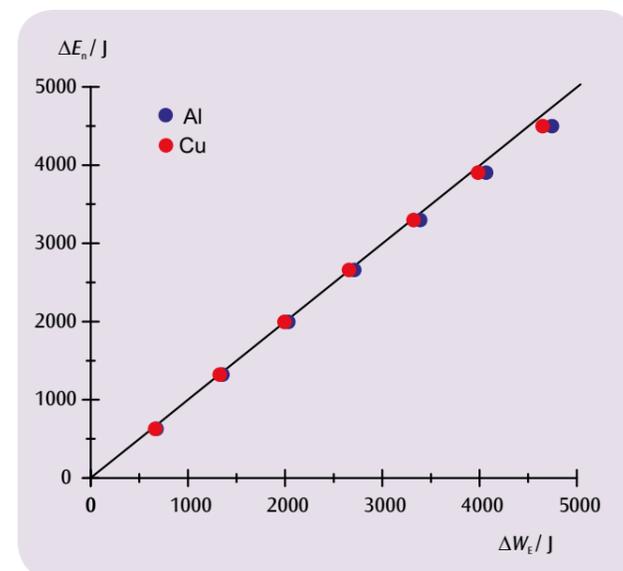
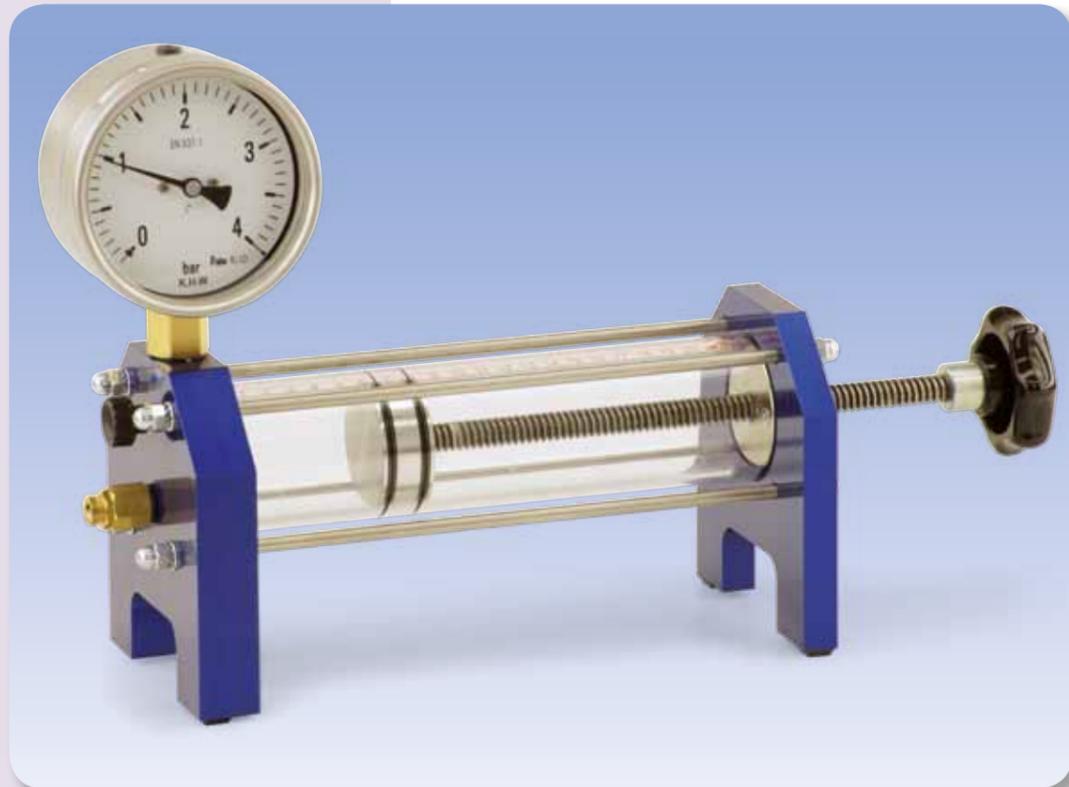


Fig. 2 Modification de l'énergie interne en fonction du travail électrique fourni



## EXERCICES

- Mesure ponctuelle de la pression  $p$  de l'air enfermé à température ambiante en fonction de la position du piston  $s$ .
- Représentation dans un diagramme pression-volume des valeurs mesurées pour trois quantités de matière différentes.
- Vérification de la Loi de Boyle-Mariotte.

## OBJECTIF

Mesure la pression de l'air à température ambiante

## RESUME

Démonstration de l'application de la Loi de Boyle-Mariotte pour les gaz parfaits appliquée à l'air à température ambiante. Celle-ci est réalisée en faisant varier le volume dans un cylindre sous l'action d'un piston et en procédant parallèlement à la mesure de la pression de l'air enfermé.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                         | Référence |
|--------|----------------------------------|-----------|
| 1      | Appareil à loi de Boyle-Mariotte | 1017366   |

1

## GENERALITES

Le volume d'une quantité de gaz dépend de la pression à laquelle ce gaz est soumis et de sa température. A température constante, le produit du volume par la pression est souvent constant. Cette loi énoncée par Robert Boyle et Edme Mariotte est valable pour tous les gaz à l'état parfait, c'est-à-dire lorsque la température du gaz est largement supérieure à ce que l'on appelle "température critique".

La loi découverte par Boyle et Mariotte

$$(1) \quad p \cdot V = \text{constante}$$

constitue un cas particulier de la loi des gaz valable pour tous les gaz parfaits. Elle décrit la relation entre la pression  $p$ , le volume  $V$ , la température  $T$  rapportée au point zéro absolu et la quantité de matière  $n$  d'un gaz :

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

$$R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} : \text{Constante universelle des gaz parfaits}$$

L'équation (2) communément admise permet de déduire le cas particulier (1) à la condition que la température  $T$  et la quantité de matière enfermée  $n$  ne varient pas.

L'expérience a pour but de démontrer l'application de la Loi de Boyle-Mariotte à l'air en tant que gaz parfait, à température ambiante. A cet effet, on fait varier le volume  $V$  dans un récipient cylindrique sous l'action d'un piston tout en mesurant la pression  $p$  de l'air enfermé. La quantité de matière enfermée  $n$  dépend du volume de départ  $V_0$ , dans lequel l'air ambiant pénétrait avant le début de l'expérience lorsque la soupape était ouverte.

## EVALUATION

Etant donné que la surface de la section  $A$  du piston est constante, le volume  $V$  de l'air emprisonné peut être facilement calculé à partir de la course du piston  $s$ . Pour obtenir une analyse exacte des données, il convient également de tenir compte du volume mort inévitable  $V_1$  de l'air dans le manomètre.

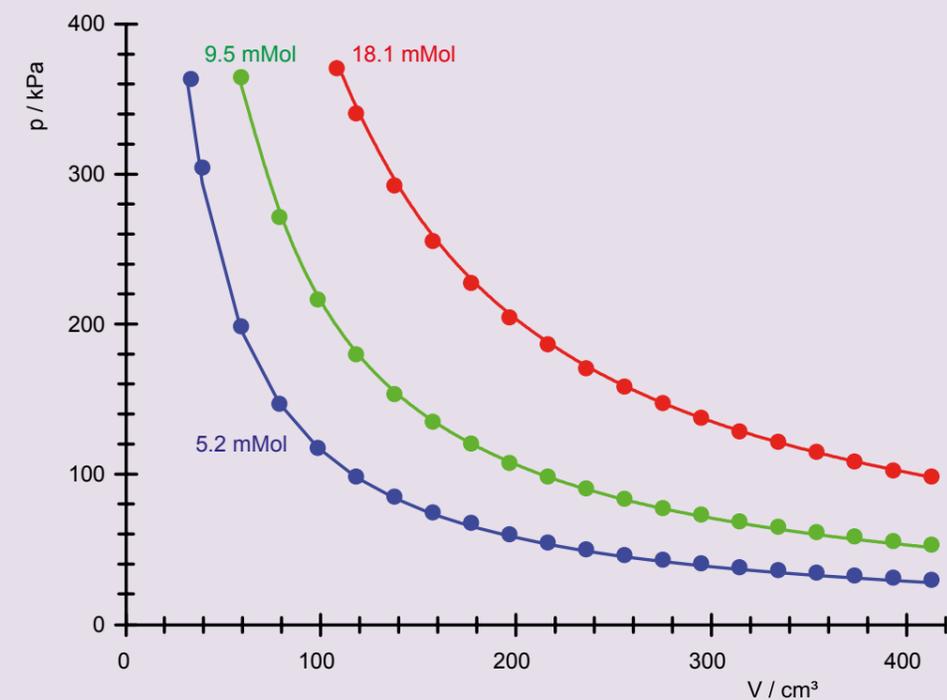


Fig. 1 Diagrammes pression-volume de l'air à température ambiante pour trois quantités de matière différentes


**OBJECTIF**

Déterminer le rapport des chaleurs spécifiques  $\gamma = C_p / C_v$  de l'air d'après l'expérience de Rüchardt

**RESUME**

L'expérience comprend un tube en verre, fixé à la verticale sur une bouteille en verre, à l'intérieur duquel un piston en aluminium effectue un mouvement oscillant vertical sur le coussin d'air formé par l'air contenu dans la bouteille et le tube. En mesurant la période d'oscillation du piston en aluminium, on peut calculer la valeur du rapport des chaleurs spécifiques de l'air, ou coefficient adiabatique de l'air.

**EXERCICES**

- Mesurer la période d'oscillation du piston en aluminium.
- Déterminer la pression d'équilibre dans le volume d'air enfermé.
- Déterminer le coefficient adiabatique de l'air et le comparer avec la valeur définie dans la littérature.

**2**
**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre                      | Appareil                      | Référence |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------|
| 1                           | Flacon de Mariotte            | 1002894   |
| 1                           | Tube à oscillation            | 1002895   |
| 1                           | Chronomètre mécanique, 15 min | 1003369   |
| 1                           | Pompe à vide manuelle         | 1012856   |
| <b>En plus recommandé :</b> |                               |           |
| 1                           | Baromètre anéroïde F          | 1010232   |
| 1                           | Pied à coulisse, 150 mm       | 1002601   |
| 1                           | Balance électronique 200 g    | 1003433   |

**GENERALITES**

Dans le montage classique de Rüchardt, on peut déterminer le coefficient adiabatique de l'air à partir du mouvement oscillant vertical d'un piston reposant sur un coussin d'air dans un tube en verre de section constante. Le piston est parfaitement ajusté à la section du tube et empêche l'air de s'échapper, formant un volume d'air fermé (bouteille et tube). Lorsque le piston est dévié de sa position d'équilibre, cela génère une augmentation ou une diminution de la pression dans le volume d'air enfermé par rapport à la pression atmosphérique, ce qui renvoie le piston dans sa position d'équilibre. La force de rappel est proportionnelle à la déviation de la position d'équilibre ; dans ce cas, le mouvement oscillant du piston est dit « harmonique ».

Étant donné qu'aucun échange de chaleur n'a lieu avec l'air ambiant, les mouvements oscillants sont associés à des changements d'états adiabatiques. La relation entre la pression  $p$  et le volume  $V$  de l'air enfermé dans la bouteille et le tube s'exprime par l'équation suivante :

$$(1) \quad p \cdot V^\gamma = \text{constante}$$

Le coefficient adiabatique  $\gamma$  est le rapport des chaleurs spécifiques à une pression constante  $C_p$  et à un volume constant  $C_v$  :

$$(2) \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

Compte tenu de la relation (1), l'équation pour les variations de pression et de volume  $\Delta p$  et  $\Delta V$  devient alors :

$$(3) \quad \Delta p + \gamma \cdot \frac{p}{V} \cdot \Delta V = 0.$$

En substituant la surface de la section interne  $A$  du tube, on peut calculer la force de rappel  $\Delta F$  à partir de la variation de pression. De la même façon, la déviation  $\Delta s$  du piston de sa position d'équilibre est calculée à partir de la variation du volume d'air.

Il en résulte l'équation :

$$(4) \quad \Delta F = -\gamma \cdot \frac{p}{V} \cdot A^2 \cdot \Delta s = 0.$$

L'équation de mouvement du piston oscillant devient alors :

$$(5) \quad m \cdot \frac{d^2 \Delta s}{dt^2} + \gamma \cdot \frac{p}{V} \cdot A^2 \cdot \Delta s = 0$$

$m$  : masse du piston

Les solutions à cette équation classique du mouvement d'un oscillateur harmonique simple sont des oscillations dont la période est donnée par :

$$(6) \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{1}{\gamma} \cdot \frac{V}{p} \cdot \frac{m}{A^2}},$$

ce qui permet de calculer le coefficient adiabatique dès lors que l'on connaît les autres grandeurs.

Dans l'expérience, un tube en verre de petite section  $A$  est fixé à la verticale dans l'orifice du bouchon en caoutchouc d'une bouteille en verre contenant un grand volume d'air  $V$ , puis un piston en aluminium de section très ajustée au tube et de masse  $m$  est glissé dans le tube en verre. Le piston en aluminium effectue alors des oscillations harmoniques sur le coussin d'air formé par le volume d'air contenu dans la bouteille et le tube. En mesurant la période d'oscillation du piston en aluminium, on peut calculer la valeur du rapport des chaleurs spécifiques de l'air, autrement dit le coefficient adiabatique de l'air.

**EVALUATION**

Compte tenu de (6), l'équation pour déterminer le coefficient adiabatique s'écrit alors :

$$\gamma = \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 \cdot \frac{m}{A^2} \cdot \frac{V}{p}$$

Le volume d'équilibre  $V$  correspond au volume de la bouteille, étant donné que celui du tube en verre est négligeable.

La pression d'équilibre  $p$  s'obtient à partir de la pression atmosphérique extérieure  $p_0$  et de la pression exercée par le piston en équilibre sur le volume d'air enfermé :

$$p = p_0 + \frac{m \cdot g}{A}$$

où  $g$  est l'accélération de la pesanteur.

Le résultat attendu s'écrit alors :

$$\gamma = \frac{7}{5} = 1,4,$$

puisque l'air est constitué essentiellement de molécules biatomiques avec 5 degrés de liberté pour l'absorption de l'énergie thermique.

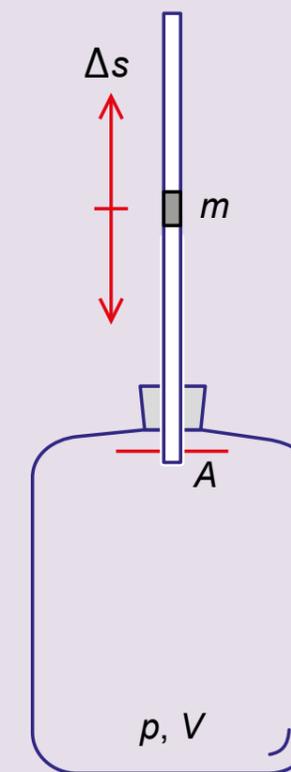
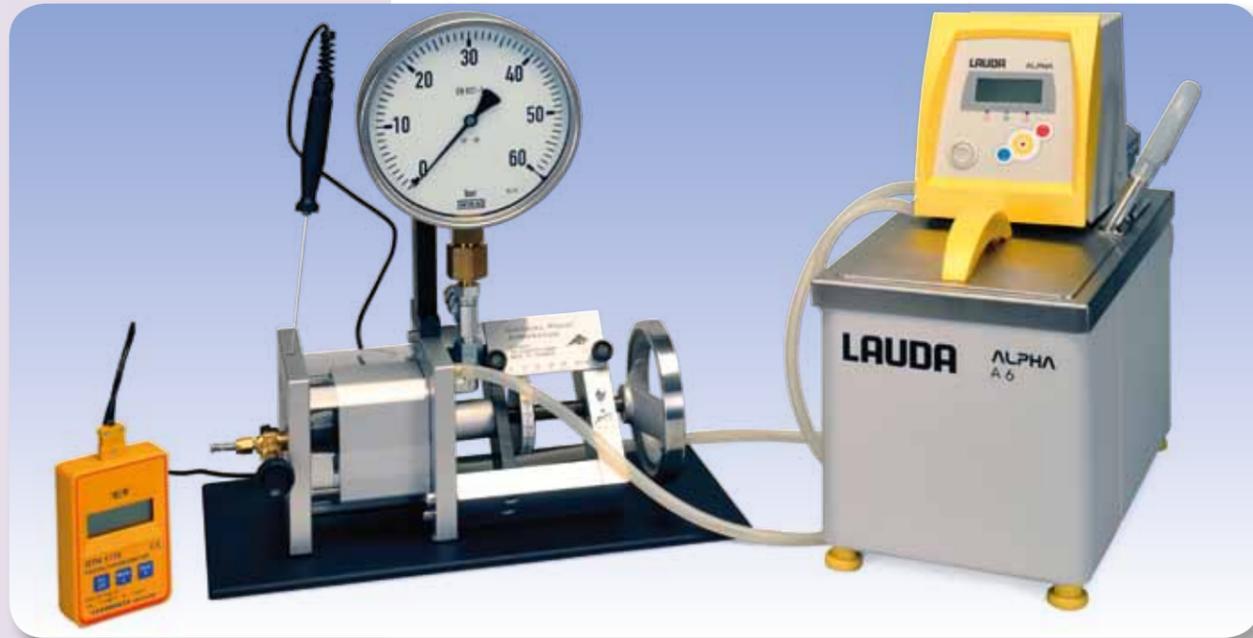


Fig. 1 Schéma du montage expérimental



## EXERCICES

- Observation de l'état liquide et gazeux de l'hexafluorure de soufre.
- Saisie des isothermes dans le diagramme  $pV$  et dans le diagramme  $pVp$ .
- Observation des écarts des gaz réels par rapport à l'état du gaz parfait.
- Représentation du point critique.
- Saisie des courbes de pression de la vapeur saturée.

## OBJECTIF

Analyse quantitative d'un gaz réel et représentation du point critique

## RESUME

Analyse de l'hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ) en tant que gaz réel dans une cellule de mesure avec un volume mort réduit au minimum. L'hexafluorure de soufre est un gaz bien adapté à cette expérience car sa température critique ( $T_c = 319$  K) et sa pression critique ( $p_c = 37,6$  bars) sont comparativement faibles. Il est de plus inoffensif et peut donc être utilisé sans problème en cours et pendant les TP.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre                          | Appareil   | Référence  |
|---------------------------------|--|------------|
| 1                               | Appareil à point critique                              | 1002670    |
| 1                               | Bains thermostatiques et circulation (230 V, 50/60 Hz) | 1008654 ou |
|                                 | Bains thermostatiques et circulation (115 V, 50/60 Hz) | 1008653    |
| 1                               | Thermomètre de poche numérique ultra-rapide            | 1002803    |
| 1                               | Sonde à immersion NiCr-Ni type K, - 65°C – 550°C       | 1002804    |
| 2                               | Tuyau flexible en silicone 6 mm                        | 1002622    |
| <b>En plus nécessairement :</b> |  |            |
|                                 | Hexafluorure de soufre ( $SF_6$ )                      |            |

## REMARQUE

Conformément aux principes de « bonnes pratiques de laboratoire », en cas d'utilisation régulière de l'appareil à point critique, il est recommandé d'utiliser une conduite fixe de raccordement du gaz. Le raccord à tube pour 1/8" (SW 11) fourni avec l'appareil peut être utilisé pour le branchement d'une bouteille de gaz.

# 3

## GENERALITES

Le point critique d'un gaz réel est caractérisé par la température critique  $T_c$ , la pression critique  $p_c$  et la densité critique  $\rho_c$ . En dessous de la température critique, la substance est gazeuse pour un grand volume et liquide pour un petit volume. L'état intermédiaire est celui d'un mélange liquide-gaz, dont la part de gaz augmente lors du changement d'état isothermique au fur et à mesure que le volume augmente. La pression du mélange reste quant à elle constante. Etant donné que le liquide et la vapeur ont des densités différentes, ils sont séparés dans le champ de pesanteur. A température croissante, la densité du liquide diminue et celle du gaz augmente jusqu'à ce que les deux densités atteignent la valeur de la densité critique. Au-delà de la température critique, il n'y a plus de liquéfaction. Lors du changement d'état isothermique, le gaz ne suit clairement la loi de Boyle-Mariotte qu'au-delà de la température critique.

L'hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ) est un gaz particulièrement bien adapté aux expériences sur les propriétés des gaz réels car sa température critique ( $T_c = 319$  K) et sa pression critique ( $p_c = 37,6$  bars) sont comparativement faibles. Il est de plus parfaitement inoffensif et peut donc être utilisé sans problème en cours et pendant les TP.

L'appareil utilisé pour l'analyse du point critique se compose d'une cellule de mesure transparente particulièrement étanche et résistante à la pression. Le volume de la cellule peut être modifié à l'aide d'une roue à main à réglage fin, la variation de volume pouvant être lue avec une précision de l'ordre de 1/1000e du volume maximal. La montée en pression est réalisée par le biais d'un système hydraulique avec de l'huile de ricin dont la qualité correspond à celle utilisée pour les applications médicales. La cellule de mesure et le système hydraulique sont séparés par un joint conique en caoutchouc qui s'enroule lorsque le volume change. Grâce à cette construction, la différence de pression entre la cellule et le compartiment à huile est pratiquement négligeable. A la place de la pression du gaz, un manomètre mesure la pression de l'huile, sans solliciter de volume mort dans la cellule. La cellule de mesure est enveloppée d'un compartiment d'eau transparent. Au cours de l'expérience, une température constante est réglée avec haute précision à l'aide d'un dispositif à thermostat (bain d'eau) ; la température peut être lue et contrôlée sur un thermomètre numérique.

Lors de l'observation des transitions de la phase gazeuse à la phase liquide et inversement, le faible volume mort permet d'observer, d'une part la formation de la première goutte de liquide et d'autre part la disparition de la dernière bulle de gaz.

## EVALUATION

A température constante, la pression est mesurée ponctuellement en fonction du volume et le résultat est représenté dans un diagramme  $pV$  (diagramme de Clapeyron) ou dans un diagramme  $pVp$  (diagramme d'Amegat). L'écart par rapport à l'état de gaz parfait saute ici aux yeux.

La représentation graphique permet de déterminer aisément les paramètres du point critique et facilite la réalisation d'une vérification expérimentale.

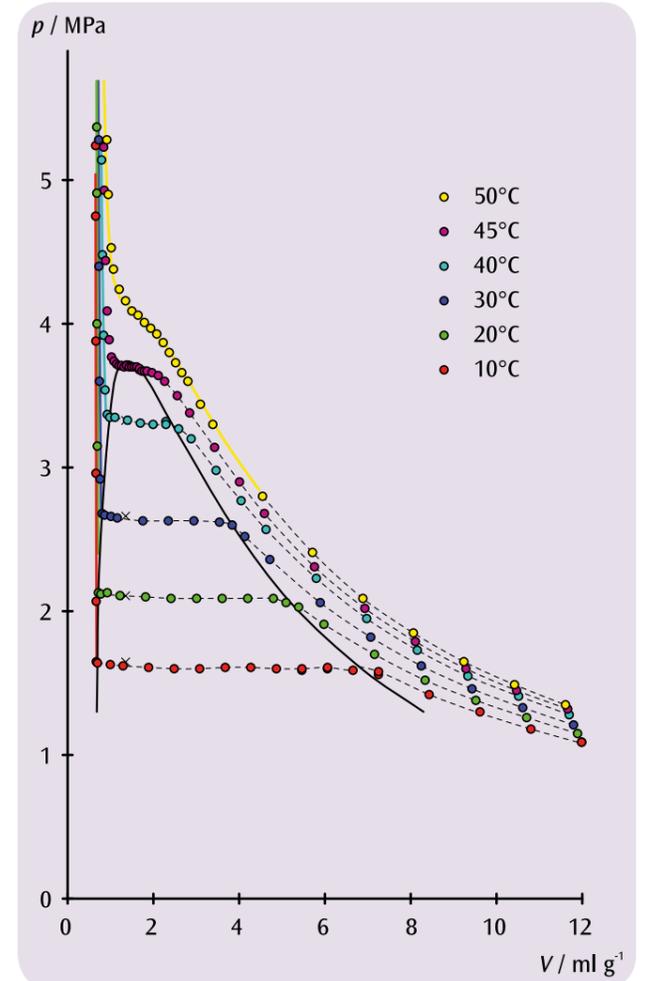


Fig. 1 Diagramme  $pV$  de l'hexafluorure de soufre



## EXERCICES

- Mise en service du moteur à air chaud servant de moteur thermique.
- Démonstration de la transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique.
- Mesure de la vitesse à vide en fonction de la puissance de chauffage.

## OBJECTIF

Fonctionnement du modèle d'un moteur à air chaud servant de moteur thermique

## RESUME

Le moteur à air chaud constitue un exemple classique de moteur thermique. Dans un cycle thermodynamique, de l'énergie thermique est alimentée depuis un réservoir à température élevée et transformée partiellement en énergie mécanique utile. Le reste de l'énergie thermique est ensuite cédée à un réservoir à faible température.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Moteur Stirling D                                   | 1000817    |
| 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    |
| 1      | Paire de cordons de sécurité, 75cm, rouge/bleu      | 1017718    |
| 1      | Chronomètre mécanique, 15 min                       | 1003369    |

# 1

## GENERALITES

Aux fins de simplification, le cycle thermodynamique du moteur à air chaud (R. Stirling, 1816) peut être divisé dans les cycles partiels suivants : chauffage, détente, refroidissement et compression. Ils sont représentés schématiquement dans la Fig. 1-4 du modèle étudié.

Lorsque le moteur à air chaud est utilisé sans charge mécanique, il tourne à une vitesse à vide qui est limitée par le frottement interne et qui dépend de la puissance thermique alimentée. La vitesse est réduite dès que de la puissance mécanique est extraite. Pour le démontrer, il suffit d'exercer une force de frottement sur l'arbre de manivelle.

## EVALUATION

### Chauffage :

Le piston de refoulement remonte et repousse l'air vers le bas, dans la partie chauffée du grand cylindre. Pendant ce temps, le piston de travail se trouve en position inférieure, car le piston de refoulement précède de 90° le piston de travail.

### Détente :

L'air réchauffé se détend et pousse le piston de travail vers le haut. Le travail mécanique est cédé au culbuteur par l'arbre de manivelle.

### Refroidissement :

Tandis que le piston de travail est au point mort supérieur, le piston de refoulement redescend et repousse l'air vers l'extérieur dans la partie supérieure du grand cylindre.

### Compression :

L'air refroidi est comprimé par le piston de travail qui se déplace vers le bas. Le travail mécanique est fourni par le culbuteur.

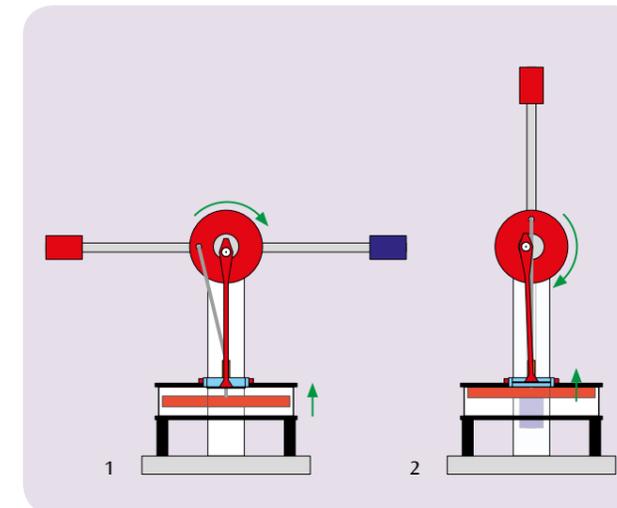


Fig. 1 : Chauffage

Fig. 2 : Détente

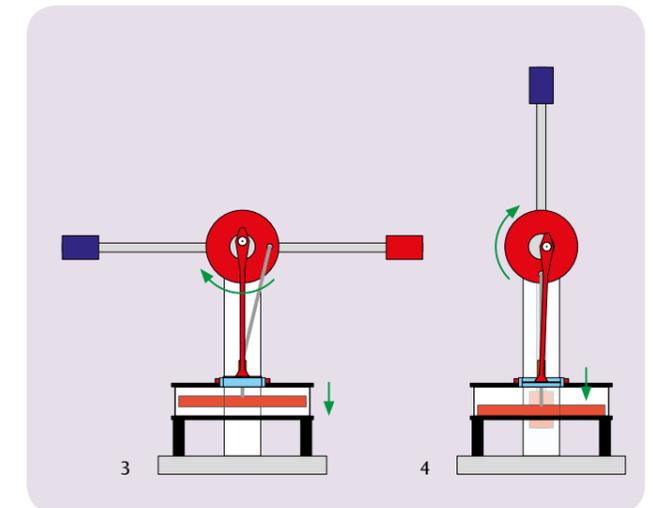


Fig. 3 : Refroidissement

Fig. 4 : Compression



## EXERCICES

- Enregistrement du diagramme  $p$ - $V$ .
- Déterminer la performance mécanique pour un cycle thermo dynamique entier et calculer le travail mécanique.

## OBJECTIF

Enregistrement du diagramme  $p$ - $V$

## RESUME

Les cycles thermo dynamiques peuvent être représentés sous la forme d'une courbe fermée dans un diagramme  $p$ - $V$  (pression-volume). L'aire comprise à l'intérieur de la courbe correspond au travail mécanique recueilli au cours d'un cycle. L'autre possibilité consiste à mesurer la performance mécanique pour un cycle entier et à calculer le travail mécanique par intégration temporelle. Ceci est étudié au moyen d'une expérience en prenant l'exemple du moteur de Stirling.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Moteur Stirling G                                   | 1002594    |
| 1      | Support de capteurs pour moteur Stirling G          | 1008500    |
| 1      | Capteur de course                                   | 1000568    |
| 1      | Capteur de pression relative $\pm 1000$ hPa         | 1000548    |
| 1      | 3B NETlab™  | 1000544    |
| 1      | 3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)                        | 1000540 ou |
|        | 3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)                        | 1000539    |
| 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    |
| 1      | Paire de cordons de sécurité, 75cm, rouge/bleu      | 1017718    |

# 2

## GENERALITES

Les cycles thermodynamiques peuvent être représentés sous la forme d'une courbe fermée dans un diagramme  $p$ - $V$  (pression-volume). L'aire située à l'intérieur de la courbe correspond au travail mécanique  $W$  récupéré au cours du cycle. L'autre possibilité consiste à déterminer la performance mécanique  $P$  pour un cycle entier et à s'en servir pour calculer le travail mécanique par intégration temporelle.

On a l'équation

$$(1) \quad W = \oint p dV$$

ou

$$(2) \quad W = \int_{t_1}^{t_2} P dt \text{ avec } P(t) = p \frac{dV}{dt}$$

Au cours de l'expérience, c'est la variante (2) qui est choisie afin de déterminer le travail mécanique qu'un moteur Stirling transparent optimisé à des fins didactiques fournit à chaque cycle. Afin de saisir la pression  $p$  dans le piston moteur, on connecte un capteur de pression relative qui saisit la différence de pression par rapport à l'environnement extérieur. Le volume  $V$  est calculé à partir du trajet effectué par le piston moteur  $s$  et de sa surface de section transversale  $A$ . Pour ce faire, le piston moteur est relié à un capteur de déplacement.

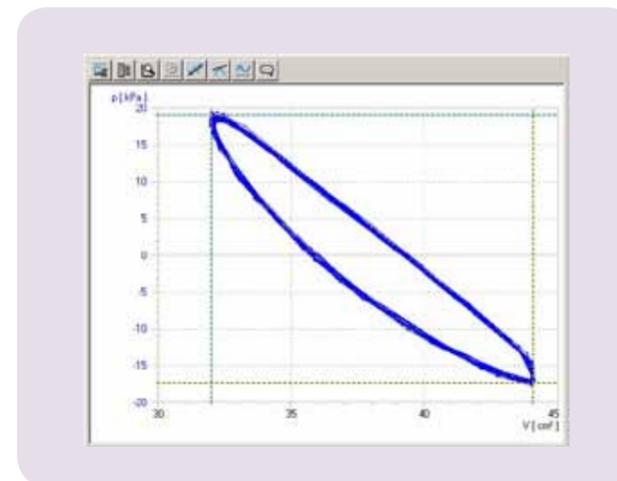


Fig. 1 Diagramme  $p$ - $V$  du moteur de Stirling G

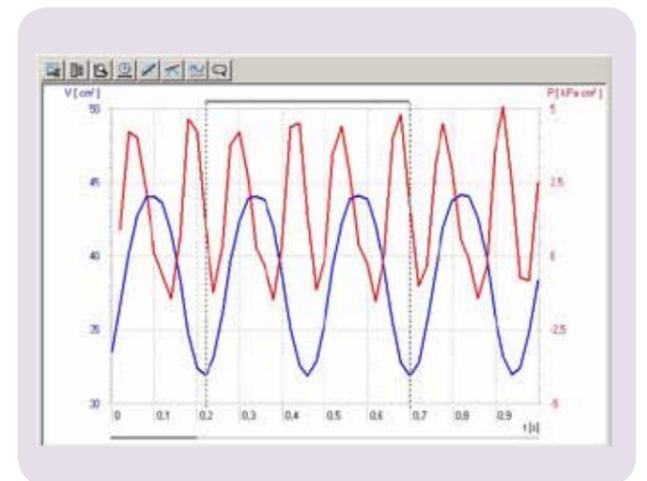


Fig. 2 Diagramme  $p(t)$ ,  $V(t)$  et  $P(t)$  du moteur de Stirling G

## EVALUATION

Afin de vérifier le cycle thermodynamique, les valeurs mesurées sont reportées dans un diagramme  $p$ - $V$ ; puis également dans un second diagramme afin de déterminer la performance mécanique en fonction du temps. Le second diagramme permet d'identifier aisément les différentes phases du cycle thermodynamique. Ceci est important pour le choix des limites d'intégration afin de calculer le travail mécanique à chaque phase du cycle, voir (2).


**OBJECTIF**

Enregistrement et analyse du diagramme Pression-Enthalpie d'une pompe à chaleur à compression

**EXERCICES**

- **Démonstration du principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur à compression.**
- **Analyse quantitative du cycle thermodynamique correspondant.**
- **Enregistrement et analyse du diagramme Pression-Enthalpie.**

**RESUME**

Une pompe à chaleur à compression électrique est composée d'un compresseur avec un moteur d'entraînement, d'un condenseur, d'une vanne de détente et d'un évaporateur. Son principe de fonctionnement repose sur un cycle fermé avec changements de phases qui est traversé par un fluide caloporteur circulant dans la pompe et qui peut être décomposé en quatre étapes : la compression, la condensation (liquéfaction), la détente (dépressurisation) et l'évaporation. Le coefficient de performance théorique du cycle thermodynamique idéalisé peut être calculé à partir des enthalpies spécifiques  $h_1$ ,  $h_2$  et  $h_3$  lues sur un diagramme de Mollier. Une fois que les enthalpies  $h_2$  et  $h_3$  du cycle thermodynamique idéalisé et que la quantité de chaleur  $\Delta Q_2$  envoyée par intervalle de temps  $\Delta t$  au réservoir d'eau chaude ont été déterminées, on peut évaluer le débit massique du fluide.

**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre                      | Appareil   | Référence  |
|-----------------------------|--|------------|
| 1                           | Pompe à chaleur D (230 V, 50/60 Hz)              | 1000820 ou |
|                             | Pompe à chaleur D (115 V, 50/60 Hz)              | 1000819    |
| 2                           | Sonde de température Pt 100 avec pince de mesure | 1009922    |
| 1                           | 3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)                     | 1000540 ou |
|                             | 3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)                     | 1000539    |
| <b>En plus recommandé :</b> |  |            |
| 1                           | 3B NETlab™                                       | 1000544    |

**GENERALITES**

Une pompe à chaleur à compression électrique est composée d'un compresseur avec un moteur d'entraînement, d'un condenseur, d'un détendeur et d'un évaporateur. Son principe de fonctionnement repose sur un cycle fermé avec transformation de phases qui est traversé par un fluide caloporteur dans la pompe et qui peut être décomposé en quatre étapes : la compression, la condensation, la détente directe et l'évaporation.

2

Au moment de la compression, le fluide caloporteur gazeux est aspiré par le compresseur, comprimé sans variation de l'entropie ( $s_1 = s_2$ ) de  $p_1$  à  $p_2$ , et surchauffé (voir Fig. 1 et Fig. 2). Cela explique que la température augmente de  $T_1$  à  $T_2$ . Le travail (énergie) mécanique de compression  $\Delta w = h_2 - h_1$  est fourni par unité massique.

Dans le condenseur, le fluide caloporteur est fortement refroidi et il se condense. La chaleur libérée (chaleur d'ébullition et chaleur de condensation) se monte à  $\Delta q_2 = h_2 - h_3$  par unité massique. Elle réchauffe le réservoir d'eau correspondant.

Le fluide caloporteur condensé passe alors dans une vanne de détente où il est ramené à une pression plus basse (sans travail mécanique apporté). Pendant cette phase, la température diminue également, puisqu'un travail doit être effectué dans le fluide frigorigène pour résister à la pression moléculaire (détente de Joule-Thomson). L'enthalpie reste constante ( $h_4 = h_3$ ).

À l'arrivée dans l'évaporateur, le fluide caloporteur récupère de la chaleur et il complètement évaporé. Il en résulte un refroidissement du réservoir. La chaleur (énergie thermique) absorbée s'élève à  $\Delta w = h_2 - h_1$  par unité massique. Le diagramme de Mollier du fluide est souvent utilisé pour représenter le cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur à compression. Ce diagramme décrit l'évolution de la pression  $p$  et de l'enthalpie spécifique  $h$  du fluide (l'enthalpie permet de mesurer le contenu thermique du fluide car elle augmente généralement lorsque la pression la proportion de gaz augmentent).

Y sont également représentées les courbes isothermes ( $T = \text{const.}$ ) et isentropiques ( $S = \text{const.}$ ), ainsi que le volume massique relatif de la phase liquide du fluide frigorigène. À gauche de ce qu'on appelle la courbe d'ébullition, le fluide est à l'état de condensation totale (liquide saturé). À droite de ce qu'on appelle la courbe de rosée, le fluide est représenté à l'état de vapeur surchauffée et entre ces deux courbes, c'est un mélange gaz-liquide. Ces deux courbes se rejoignent au point critique.

Afin de représenter le système dans un diagramme de Mollier, on détermine le cycle thermodynamique idéalisé décrit plus haut en mesurant les pressions  $p_1$  et  $p_2$  à l'arrière et à l'avant de la vanne de détente ainsi que la température  $T_1$  avant le compresseur et la température  $T_3$  avant la vanne de détente. Dans l'expérience, les composants du système sont reliés par une conduite en cuivre en un circuit fermé qui est monté sur une planche support. Grâce à leur disposition claire dans le montage expérimental, les différents composants peuvent être associés directement aux phases de transformation subies par le fluide dans le cycle thermodynamique de la pompe à chaleur. L'évaporateur et le condenseur sont conçus avec des tuyaux en cuivre en serpents et sont immergés chacun dans un bassin d'eau qui sert de réservoir pour déterminer l'énergie thermique absorbée ou libérée. Deux grands manomètres indiquent le niveau de pression du fluide frigorigène dans les deux échangeurs thermiques. Deux thermomètres analogiques permettent de mesurer la température dans les deux bassins d'eau. Des sondes de température à pince adaptées sont utilisées pour relever la température dans les tuyaux en cuivre avant le compresseur et avant la vanne de détente.

Le coefficient de performance théorique du cycle thermodynamique idéalisé peut être calculé à partir des enthalpies spécifiques  $h_1$ ,  $h_2$  et  $h_3$  lues sur le diagramme de Mollier :

$$(1) \quad \eta_{th} = \frac{\Delta q_2}{\Delta w} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

Une fois qu'on a déterminé les enthalpies  $h_2$  et  $h_3$  du cycle thermodynamique idéalisé ainsi que la quantité de chaleur  $\Delta Q_2$  envoyée par intervalle de temps  $\Delta t$  au réservoir d'eau chaude, on peut évaluer le débit massique du fluide.

$$(2) \quad \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\Delta Q_2}{\Delta t} \cdot \frac{1}{h_2 - h_3}$$

**EVALUATION**

$T_1$  et  $p_1$  déterminent la position du point 1 dans le diagramme de Mollier. Le point d'intersection des isentropes correspondants avec l'horizontale  $p_2 = \text{const.}$  donne le point 2. Le point d'intersection de l'horizontale avec la courbe d'ébullition détermine le point 3, tandis qu'une perpendiculaire à l'horizontale  $p_4 = \text{const.}$  détermine le point 4. La mesure additionnelle de la température  $T_3$  permet une observation plus approfondie et une meilleure compréhension des différentes phases de transformation du fluide qui ont lieu dans la pompe à chaleur :  $T_3$  ne concorde pas avec la température relevée sur l'échelle du manomètre correspondant. Cette échelle de température est basée sur la courbe de pression vapeur du fluide. Par conséquent, cette mesure met en évidence le fait qu'avant d'arriver à la vanne de détente, le fluide frigorigène n'est pas un mélange gaz-liquide, mais qu'il est à l'état complètement liquide.

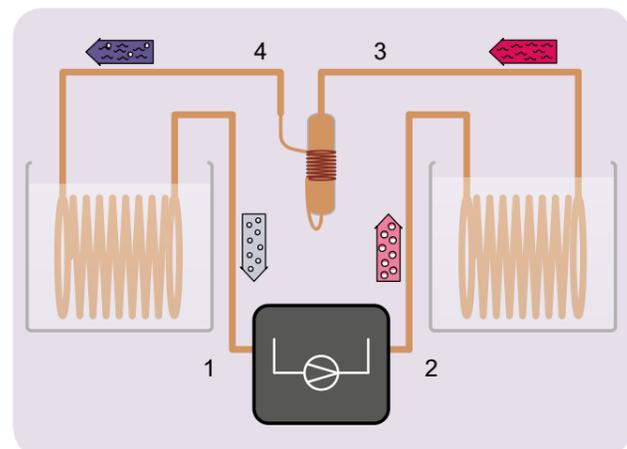


Fig. 1 Représentation schématique de la pompe à chaleur avec un compresseur (1, 2), un condenseur (2, 3), un détendeur (3, 4) et un évaporateur (4, 1)

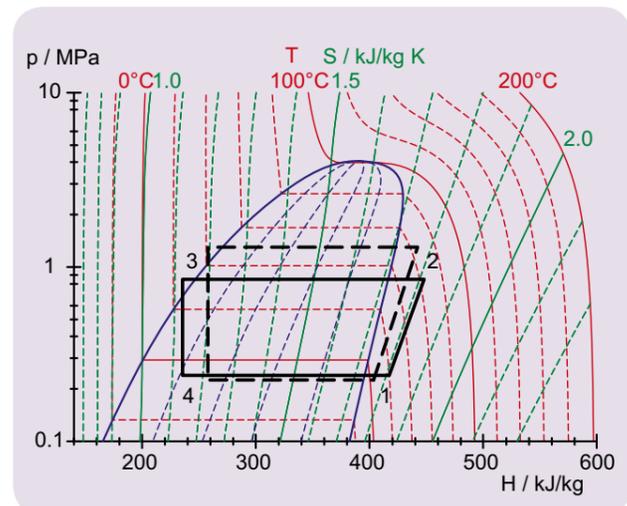


Fig. 2 Représentation sur un diagramme de Mollier du cycle thermodynamique idéalisé de la pompe à chaleur



## EXERCICES

- Mesure du champ électrique dans un condensateur à plaques en fonction de la distance entre les plaques.
- Mesure du champ électrique dans un condensateur à plaques en fonction de la tension appliquée.

## OBJECTIF

Mesure du champ électrique dans un condensateur à plaques à l'aide du mesureur de champ électrique

## RESUME

Le dispositif de mesure du champ électrique permet de mesurer le champ électrique dans un condensateur à plaques. Un disque à ailettes tournant interrompt le flux électrique sur une plaque électrostatique formant une partie d'une plaque de condensateur. Les impulsions de tension ainsi produites sont amplifiées et redressées en une tension de sortie qui est proportionnelle au champ électrique  $E$  agissant sur la plaque électrostatique.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                                       | Référence  |
|--------|--|------------|
| 1      | Mesureur de champ électrique (230 V, 50/60 Hz) | 1001030 ou |
|        | Mesureur de champ électrique (115 V, 50/60 Hz) | 1001029    |
| 1      | Alimentation CC 450 V (230 V, 50/60 Hz)        | 1008535 ou |
|        | Alimentation CC 450 V (115 V, 50/60 Hz)        | 1008534    |
| 1      | Multimètre numérique E                         | 1006809    |
| 1      | Multimètre analogique AM50                     | 1003073    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm           | 1002843    |

1

## GENERALITES

Le dispositif de mesure du champ électrique permet une mesure directe des champs électriques : un disque à ailettes de forme régulière tourne devant une plaque électrostatique dotée de quatre secteurs en forme d'étoile. Le disque interrompt constamment le flux électrique, provoquant ainsi l'apparition périodique de charges électrostatiques qui se déchargent via une résistance de haute valeur ohmique. Les impulsions de tension ainsi produites sont amplifiées et redressées en une tension de sortie qui est proportionnelle au champ électrique  $E$  agissant sur la plaque électrostatique.

Dans le cadre de l'expérience, l'intensité du champ électrique

$$(1) \quad E = \frac{U}{d}$$

d'un condensateur à plaques est mesurée à l'aide du dispositif de mesure de champ électrique. Pour ce faire, on fait varier d'une part la tension appliquée  $U$  et, d'autre part, la distance  $d$  entre les plaques du condensateur.

## EVALUATION

Lors de l'application d'une équation, il convient de tenir compte du fait que la plaque électrostatique est décalée d'environ 1 mm vers le bas par rapport à la plaque de condensateur inférieure. L'équation 1 doit donc être remplacée par l'équation

$$E = \frac{U}{d_{\text{eff}}} = \frac{U}{d + 1 \text{ mm}}$$

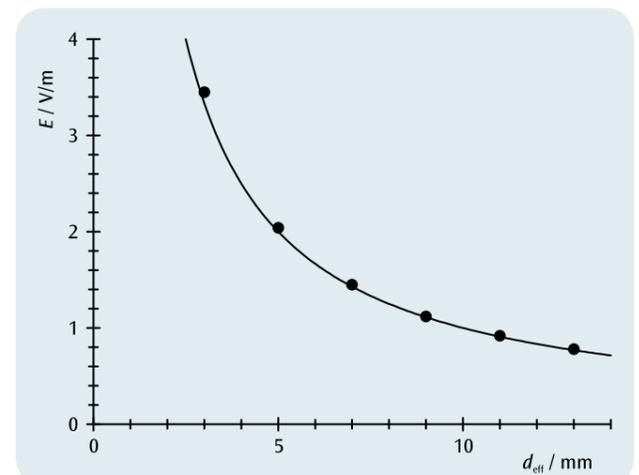


Fig. 1 Champ électrique dans le condensateur à plaques en fonction de la distance effective entre les plaques

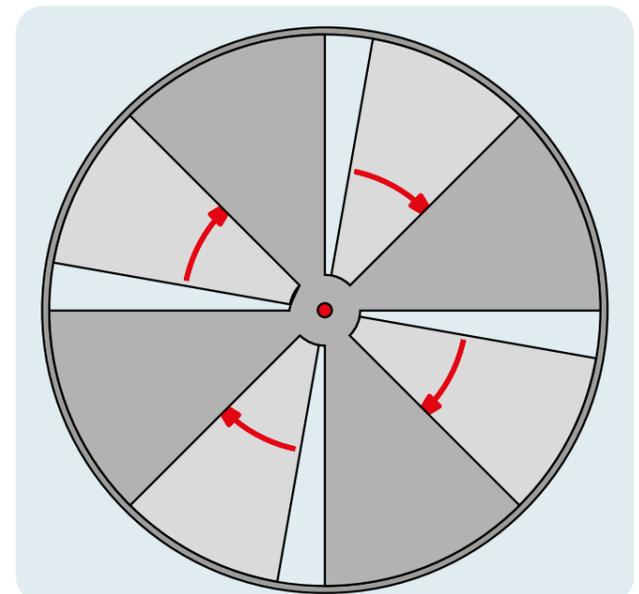


Fig. 2 Disque à ailettes tournant du mesureur de champ électrique



## EXERCICES

- Mesure statique de la tension sur un condensateur à plaques en fonction de l'écart entre les plaques.
- Validation de la proportionnalité entre la tension et l'écart entre les plaques pour de faibles écarts.

## OBJECTIF

Mesure statique de la tension en fonction de l'écart entre les plaques du condensateur

## RESUME

Un travail mécanique est nécessaire pour augmenter l'écart entre les plaques d'un condensateur chargées et séparées de tout câble d'alimentation. Ceci peut être démontré en mesurant l'augmentation de la tension entre les plaques à l'aide d'un voltmètre statique.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Mesureur de champ électrique (230 V, 50/60 Hz)                  | 1001030 ou |
|        | Mesureur de champ électrique (115 V, 50/60 Hz)                  | 1001029    |
| 1      | Condensateur à plaques D  | 1006798    |
| 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    |
| 1      | Multimètre analogique AM50                                      | 1003073    |
| 1      | Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 2,5 mm <sup>2</sup> | 1002841    |

1

## GENERALITES

Les plaques chargées d'un condensateur à plaques exercent une force d'attraction les unes sur les autres. Pour accroître la distance entre les plaques d'un condensateur à plaques sous charge électrique et séparé de toute alimentation, il est donc nécessaire d'accomplir un travail mécanique. L'énergie ainsi fournie au condensateur peut être démontrée sous forme d'augmentation de la tension entre les plaques, après s'être assuré qu'aucun courant ne puisse circuler entre les plaques pendant la mesure de la tension.

Pour préciser davantage les relations, on observe le champ électrique homogène  $E$  entre les plaques du condensateur qui supportent les charges  $Q$  et  $-Q$ . On obtient l'équation

$$(1) \quad E = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{A}$$

$A$ : Surface des plaques,

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}} : \text{constante diélectrique du vide}$$

Si, lors d'une modification de l'écart entre les plaques  $d$ , aucun courant ne peut circuler, la charge électrique  $Q$  et, par conséquent, le champ électrique  $E$  demeurent inchangés.

Pour les distances de moindre importance, pour lesquels le champ électrique peut être considéré comme homogène, on a l'équation suivante pour la tension  $U$  sur le condensateur et le champ électrique  $E$

$$(2) \quad U = E \cdot d$$

$d$ : Distance entre les plaques

autrement dit, la tension  $U$  est proportionnelle à la distance (ou écart)  $d$ . Cette assertion est vérifiée dans le cadre de l'expérience réalisée avec le dispositif de mesure du champ électrique, en utilisant un voltmètre statique. Il est ainsi garanti qu'aucun courant ne puisse circuler entre les plaques du condensateur via le voltmètre et que l'on conserve la charge électrique  $Q$  sur les plaques du condensateur.

## EVALUATION

L'équation 2 laisse supposer dans le diagramme  $U(d)$  une droite sur le système des coordonnées traversant les points de mesure, dont la pente correspond au champ électrique constant  $E$ . Les écarts constatés sont dus au fait que l'homogénéité du champ électrique ne peut plus être garanti lorsque la distance entre les plaques augmente.

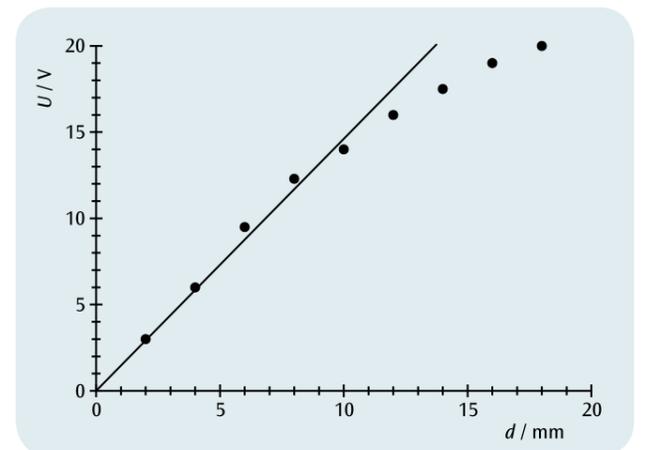


Fig. 1 Tension  $U$  sur le condensateur à plaques en fonction de la distance entre les plaques  $d$



**OBJECTIF**

Démontrer le courant électrique généré par le déplacement de gouttes d'eau chargées

**RESUME**

Un courant électrique est généré par des charges transportées pendant un intervalle de temps. Il est aisé d'illustrer un flux électrique en le comparant à des gouttes d'eau chargées. Pour la mesure, on utilise une burette et une coupe de Faraday branchée à un électromètre. La charge accumulée pendant un certain temps dans une coupe de Faraday est mesurée à l'aide de la tension électrique qui chute au niveau d'un condensateur. On s'en sert pour déterminer la charge par goutte et le courant.

**EXERCICES**

- Mesurer la charge qui est transportée pendant un temps défini dans une coupe de Faraday par des gouttes d'eau chargées s'écoulant d'une burette.
- Déterminer le courant électrique généré par le déplacement des gouttes d'eau chargées.
- Déterminer la charge par goutte.

**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre                      | Appareil  | Référence  |
|-----------------------------|---|------------|
| 1                           | Électromètre (230 V, 50/60 Hz)                              | 1001025 ou |
|                             | Électromètre (115 V, 50/60 Hz)                              | 1001024    |
| 1                           | Accessoires pour électromètre                               | 1006813    |
| 1                           | Multimètre analogique AM50                                  | 1003073    |
| 1                           | Burette, 10 ml  | 1018065    |
| 1                           | Fil de Constantan 0,2 mm/ 100 m                             | 1000955    |
| 1                           | Alimentation CC 450 V (230 V, 50/60 Hz)                     | 1008535 ou |
|                             | Alimentation CC 450 V (115 V, 50/60 Hz)                     | 1008534    |
| 1                           | Multimètre numérique P3340                                  | 1002785    |
| 1                           | Chronomètre numérique                                       | 1002811    |
| 1                           | Socle pour statif, trépied, 150 mm                          | 1002835    |
| 1                           | Tige statif, 1000 mm  | 1002936    |
| 2                           | Noix universelle  | 1002830    |
| 1                           | Pince universelle   | 1002833    |
| 1                           | Pince crocodile 4 mm, nue                                   | 1002844    |
| 1                           | Jeu de 3 cordons de sécurité pour l'appareil de chute libre | 1002848    |
| 2                           | Paire de cordons de sécurité, 75cm, rouge/bleu              | 1017718    |
| 1                           | Ballon à pipette standard                                   | 1013392    |
| 1                           | Jeu de 10 bécans, forme basse                               | 1002872    |
| <b>En plus recommandé :</b> |   |            |
| 1                           | 3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)                                | 1000540 ou |
|                             | 3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)                                | 1000539    |
| 1                           | 3B NETlab™  | 1000544    |



**GENERALITES**

Un courant électrique est généré par une quantité de charges qui sont transportées pendant un intervalle de temps. Il est aisé d'illustrer un flux électrique en le comparant à des gouttes d'eau chargées.

Dans l'expérience, un nombre  $N$  de gouttes d'eau chargées s'égoutte d'une burette à un rythme constant d'environ une goutte par seconde dans une coupe de Faraday branchée à un électromètre doté d'un condensateur. Le condensateur est chargé par la charge  $Q$  accumulée dans la coupe de Faraday et la tension électrique chutant au niveau du condensateur est observée et mesurée à l'aide d'un multimètre analogique pendant un temps  $t$  défini. L'entrée à haute impédance de l'amplificateur opérationnel dans l'électromètre garantit que le condensateur ne se décharge pas.

L'observation du multimètre analogique montre qu'à chaque goutte chargée recueillie dans la coupe de Faraday, la tension au niveau du condensateur augmente du même montant, c'est-à-dire que chaque goutte d'eau porte toujours la même charge.

(1)  $q = \frac{Q}{N}$

Le courant transporté est

(2)  $I = \frac{Q}{t}$

En option, la tension chutant au niveau du condensateur peut être enregistrée et représentée graphiquement avec 3B NETlog™ et 3B NETlab™ en fonction du temps  $t$ .

**EVALUATION**

On détermine la charge  $Q$  accumulée dans la coupe de Faraday en lisant la tension  $U$  et en calculant  $Q$  :

$Q = C \cdot U$  avec  $C = 1 \text{ nF}$  : capacité du condensateur

3B NETlog™ et 3B NETlab™ permettent de mesurer la courbe de temps  $Q(t)$ . Il est en marches d'escalier et les différentes marches représentent la charge  $q$  qui s'ajoute à chaque goutte à chaque intervalle de temps  $\Delta t$ . La constance dans la hauteur de marche indique que chaque goutte d'eau porte à peu près la même charge.

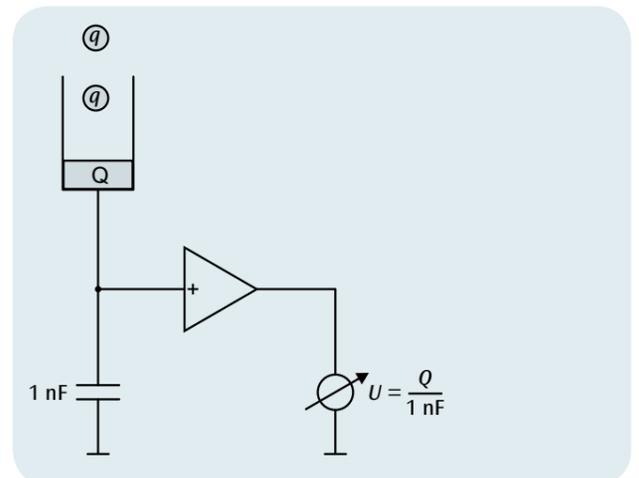


Fig. 1 Représentation schématique expliquant le principe de mesure

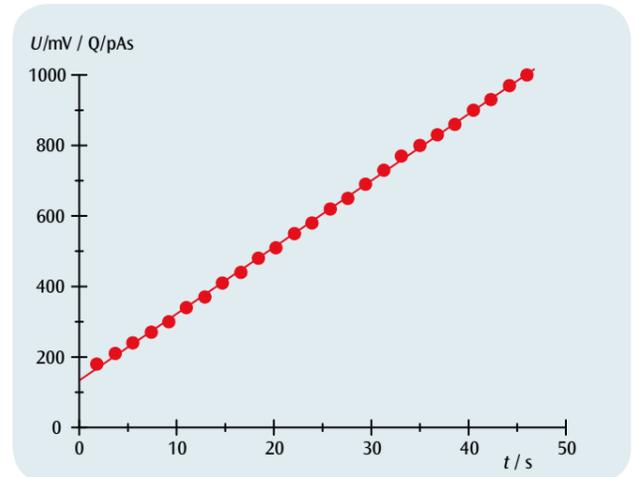


Fig. 2 Charge accumulée  $Q$  comme fonction du temps  $t$



EXERCICES

- Mesure de la chute de tension  $U$  en fonction de la distance  $d$  entre les points de contact pour un courant d'intensité  $I$  fixe.
- Mesure de la chute de tension  $U$  en fonction de l'intensité de courant  $I$  pour une distance  $d$  fixe entre les points de contact.
- Calcul de la conductivité électrique du cuivre et de l'aluminium et comparaison avec les valeurs définies dans la littérature.

OBJECTIF

Déterminer la conductivité électrique du cuivre et de l'aluminium.

RESUME

La conductivité électrique d'un matériau dépend fortement de ses caractéristiques physiques. Elle se définit comme facteur de proportionnalité entre l'intensité du courant et le champ électrique dans le matériau étudié. Dans l'expérience, elle est déterminée par la méthode de la mesure quatre fils qui permet de réaliser une série de relevés du courant et de la tension sur des barres en métal de section et de longueur connues.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Barre conductrice de chaleur (Al)                               | 1017331    |
| 1      | Barre conductrice de chaleur (Cu)                               | 1017330    |
| 1      | Alimentation CC 1 – 32 V, 0 – 20 A (115 V, 50/60 Hz)            | 1012858 ou |
|        | Alimentation CC 1 – 32 V, 0 – 20 A (230 V, 50/60 Hz)            | 1012857    |
| 1      | Microvoltmètre (230 V, 50/60 Hz)                                | 1001016 ou |
|        | Microvoltmètre (115 V, 50/60 Hz)                                | 1001015    |
| 1      | Multimètre numérique E  | 1006809    |
| 1      | Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 2,5 mm <sup>2</sup> | 1002841    |



GENERALITES

La conductivité électrique d'un matériau dépend fortement de ses caractéristiques physiques. Elle se définit comme facteur de proportionnalité entre l'intensité du courant et le champ électrique dans le matériau étudié. Dans l'expérience, elle est déterminée par la méthode de la mesure quatre fils qui permet de réaliser une série de relevés du courant et de la tension sur des barres en métal de section et de longueur connues.

De la relation

$$(1) \quad j = \sigma \cdot E$$

$j$  : intensité du courant,  $E$  : champ électrique,

Dans le cas d'un conducteur métallique de section  $A$  et de longueur  $d$ , on en déduit entre le courant  $I$  traversant le conducteur et la tension  $U$  diminuant le long du trajet  $d$  la relation suivante :

$$(2) \quad I = j \cdot A = A \cdot \sigma \cdot \frac{U}{d}$$

Cette relation est utilisée pour l'expérience sur la conductivité de barres en métal par la méthode de mesure quatre fils. Pour cela, on applique un courant d'intensité  $I$  via deux branchements et on mesure la chute de tension  $U$  qui en résulte entre deux points de contact séparés par un intervalle  $d$ .

Étant donnée la valeur de la section  $A$  connue, on peut calculer  $\sigma$ . L'expérience décrite ici utilise les mêmes barres métalliques que celles utilisées dans l'expérience UE2020100 sur la conductivité thermique. La baisse de tension est mesurée entre deux points de mesure au moyen de pointes de sondes qui peuvent également être utilisés pour relever la température le long des barres.

REMARQUE

En comparant les valeurs mesurées avec celles obtenues au cours de l'expérience UE2020100 sur la conductivité thermique, il est possible de confirmer la loi de Wiedemann-Franz. Cette loi décrit la relation proportionnelle entre la conductivité thermique et la conductivité électrique de métaux possédant un facteur de proportionnalité universel qui dépend de la température.

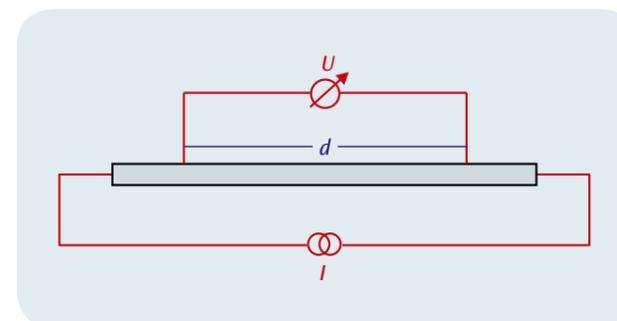


Fig. 3 Représentation schématique de la mesure 4 fils

EVALUATION

Les valeurs mesurées pour un courant d'intensité  $I$  fixe sont représentées dans un diagramme  $U-d$ . Les tensions de contact entre la pointe de mesure et la barre de métal peuvent éventuellement entraîner un décalage des droites par rapport à l'origine. La pente des droites obtenues est donnée par l'équation (2) :

$$\alpha = \frac{I}{A \cdot \sigma}$$

$I$  et  $A$  étant connus, on peut calculer la conductivité :

$$\sigma = \frac{I}{A \cdot \alpha}$$

Dans les diagrammes  $U-I$ , la pente est donnée par

$$\beta = \frac{d}{A \cdot \sigma}$$

Par conséquent :

$$\sigma = \frac{d}{A \cdot \beta}$$

En comparant les résultats avec les valeurs définies dans la littérature pour le cuivre et l'aluminium purs, on constate que les barres métalliques utilisées ne sont pas constituées de métaux purs, mais d'alliages de cuivre ou d'aluminium.

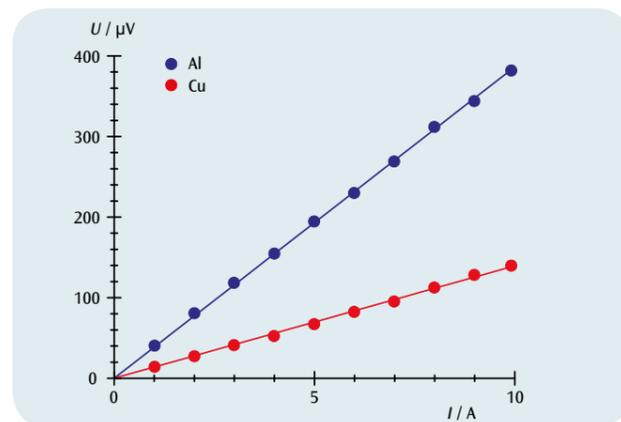


Fig. 1 Diagramme  $U-d$  pour le cuivre et l'aluminium

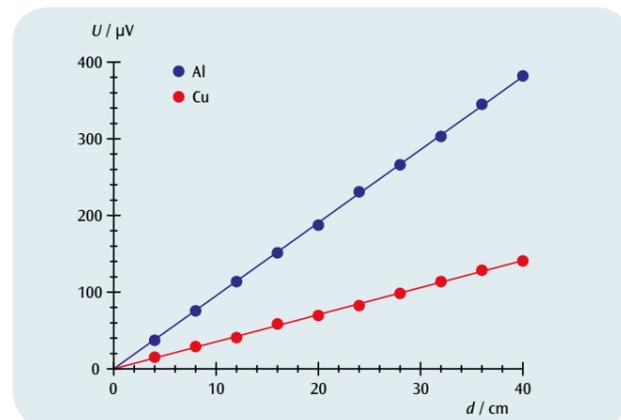
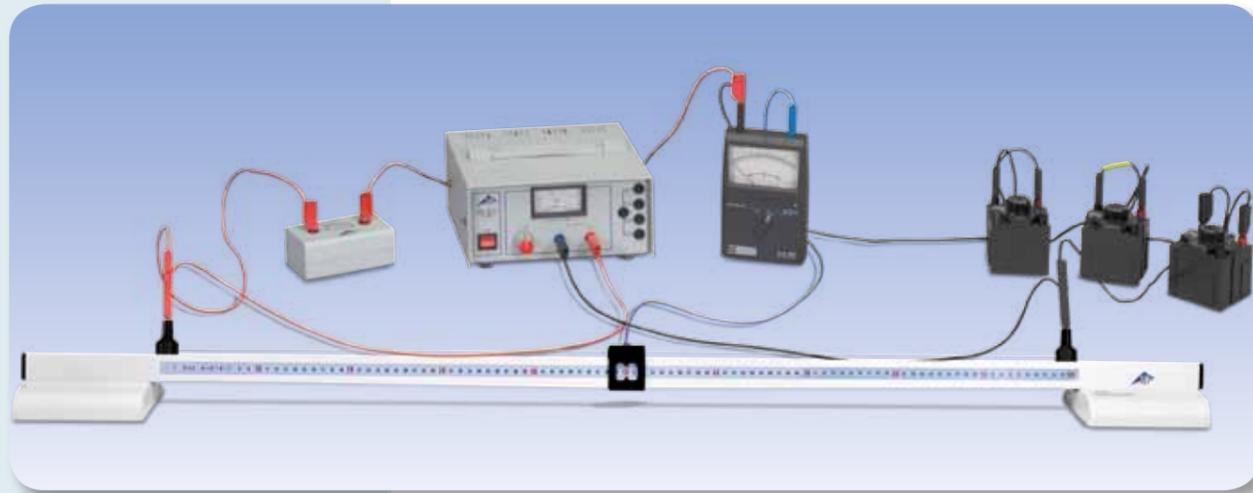


Fig. 2 Diagramme  $U-I$  pour le cuivre et l'aluminium



## EXERCICES

- Détermination des résistances ohmiques dans un pont de mesure de Wheatstone.
- Évaluation de la précision de mesure.

## OBJECTIF

Détermination des résistances ohmiques

## RESUME

Les résistances ohmiques sont déterminées dans un circuit parallèle de deux diviseurs de tension connectés à la même source de tension continue. Le premier est constitué de la résistance à mesurer et d'une résistance de référence, le second d'un fil de résistance d'un mètre de long divisé en deux parties par un curseur. Leur rapport est modifié jusqu'à ce que le courant transversal  $I$  passant entre les deux diviseurs de tension soit compensé à zéro.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil   | Référence  |
|--------|--|------------|
| 1      | Pont de Wheatstone                                 | 1009885    |
| 1      | Alimentation CA/CC 0 – 12 V, 3 A (230 V, 50/60 Hz) | 1002776 ou |
|        | Alimentation CA/CC 0 – 12 V, 3 A (115 V, 50/60 Hz) | 1002775    |
| 1      | Galvanomètre à zéro central CA 403                 | 1002726    |
| 1      | Décade de résistance 1 $\Omega$                    | 1002730    |
| 1      | Décade de résistance 10 $\Omega$                   | 1002731    |
| 1      | Décade de résistance 100 $\Omega$                  | 1002732    |
| 1      | Résistance de précision 1 $\Omega$                 | 1009843    |
| 1      | Résistance de précision 10 $\Omega$                | 1009844    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm               | 1002843    |

# 1

## GENERALITES

Traditionnellement, on détermine les résistances ohmiques dans un pont de mesure de compensation nommé d'après *Ch. Wheatstone* en les comparant avec une résistance de référence. On réalise pour cela un circuit parallèle de deux diviseurs de tension connectés à la même source de tension continue. Le premier diviseur de tension est constitué de la résistance à mesurer  $R_x$  et de la résistance de référence  $R_{ref}$ , le second des résistances  $R_1$  et  $R_2$ , dont la somme reste inchangée pendant la compensation (voir fig. 1).

Le rapport entre les résistances  $R_1$  et  $R_2$  et – si nécessaire – la résistance de référence  $R_{ref}$  est modifié jusqu'à ce que le courant transversal  $I$  soit compensé à zéro. C'est très précisément le cas lorsque le rapport de résistance des deux diviseurs de tension est identique. Cette condition permet de déduire la résistance inconnue  $R_x$  :

$$(1) \quad R_x = R_{ref} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

La précision du résultat dépend de la précision de la résistance de référence  $R_{ref}$  et du rapport de résistance  $R_1/R_2$  et de la sensibilité du galvanomètre à zéro.

Dans l'expérience, le second diviseur de tension est formé par un fil de résistance d'un mètre de long divisé par un curseur en deux parties de longueurs  $s_1$  et  $s_2$ . Comme la somme  $R_1 + R_2$  est constante, la résistance de référence doit être choisie de manière à ce que les deux parties présentent environ la même longueur et ainsi la même résistance.

## EVALUATION

Comme les deux résistances  $R_1$  et  $R_2$  sont représentées par les deux parties du fil de résistance, l'équation (1) est modifiée :

$$R_x = R_{ref} \cdot \frac{s_1}{s_2} = R_{ref} \cdot \frac{s_1}{1m - s_1}$$

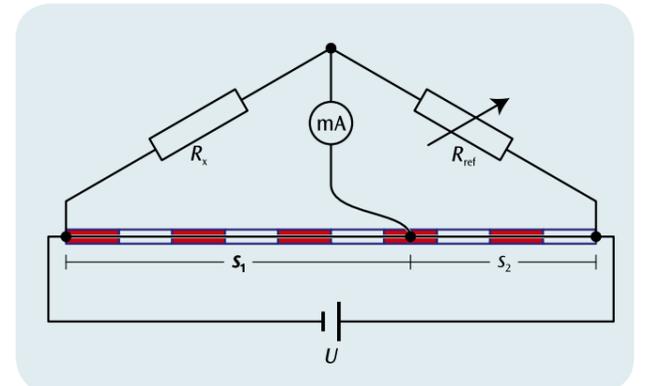
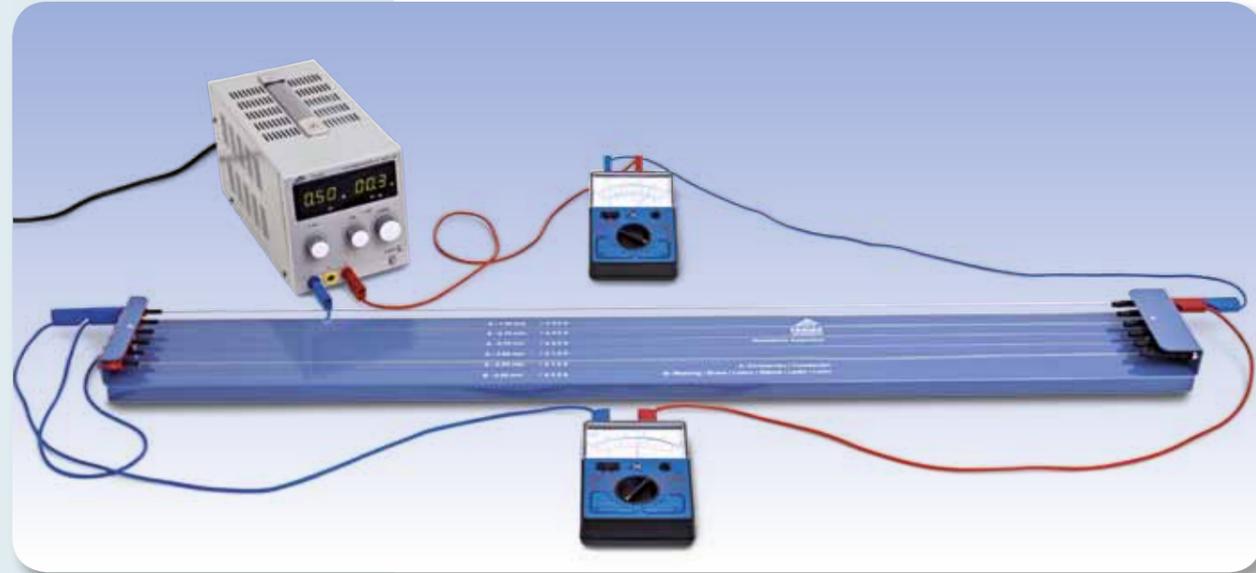


Fig. 1 Représentation schématique du pont de Wheatstone



## EXERCICES

- Confirmation de la loi d'Ohm pour un fil en constantan et un fil en laiton.
- Confirmation de la loi d'Ohm pour des fils en constantan de différentes longueurs.
- Confirmation de la loi d'Ohm pour des fils en constantan de différentes épaisseurs.

## OBJECTIF

Confirmation de la loi d'Ohm

## RESUME

Un courant  $I$  traversant un conducteur électrique simple est proportionnel à la tension  $U$  appliquée. La constante de proportionnalité, la résistance ohmique  $R$ , dépend de la longueur  $x$  du conducteur, de sa section transversale  $A$  et du type de matériau. Ce rapport est vérifié sur des fils en constantan et des fils en laiton.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Appareil de résistance                              | 1009949    |
| 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 analogique AM50                          | 1003073    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm                | 1002843    |

1

## GENERALITES

Georg Simon Ohm a démontré le premier, en 1825, que le courant qui traverse des conducteurs électriques simples est proportionnel à la tension appliquée.

Il en résulte donc la loi d'Ohm

$$(1) \quad U = R \cdot I$$

avec la constante de proportionnalité  $R$ , soit la résistance du conducteur. Pour un fil métallique de longueur  $x$  et de section transversale  $A$ , la résistance  $R$  s'obtient par

$$(2) \quad R = \rho \cdot \frac{x}{A}$$

$\rho$  étant ici la résistance spécifique qui dépend du matériau du fil. Pour valider ces rapports fondamentaux, l'expérience réalisée va analyser la proportionnalité entre le courant et la tension pour des fils métalliques d'épaisseur et de longueur différentes et de matériaux divers. La résistance spécifique va de plus être déterminée et comparée avec les valeurs fournies par la littérature spécialisée.

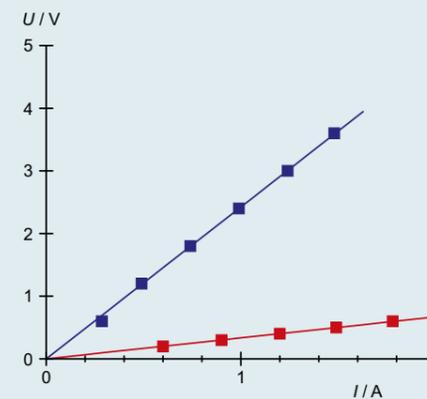


Fig. 1 Diagramme tension/courant ( $U-I$ ) pour un fil en constantan (bleu) et un fil en laiton (rouge)

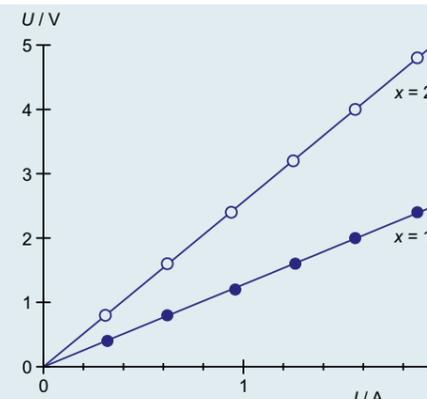


Fig. 2 Diagramme tension/courant ( $U-I$ ) pour des fils en constantan de différentes longueurs

## EVALUATION

On calcule la section transversale  $A$  à partir de l'épaisseur  $d$  du fil :

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$$

Les valeurs de mesures sont représentées dans trois diagrammes tension/courant ( $U-I$ ), dans lesquels varie respectivement l'une des trois grandeurs  $\rho$ ,  $x$  et  $d$  servant de paramètres.

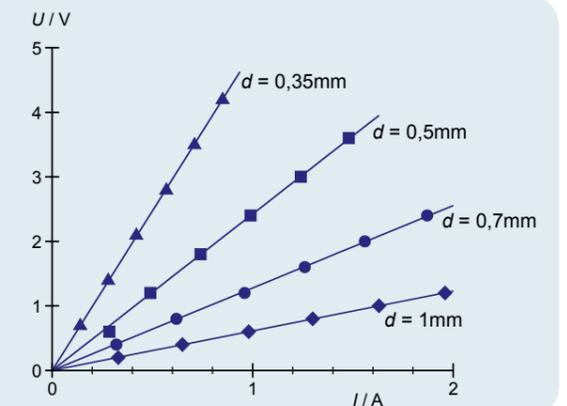


Fig. 3 Diagramme tension/courant ( $U-I$ ) pour des fils en constantan de différentes épaisseurs

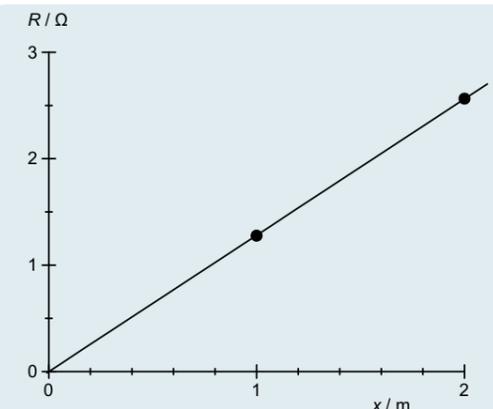


Fig. 4 Résistance  $R$  en fonction de la longueur

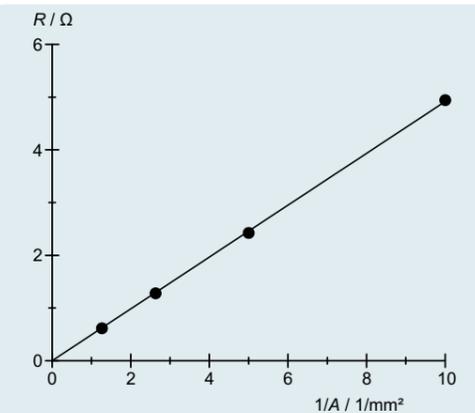
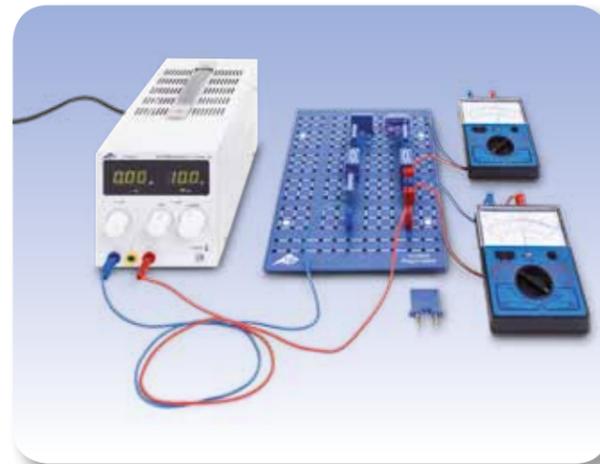


Fig. 5 Résistance  $R$  en fonction de l'inverse de la section transversale  $A$



## EXERCICES

- Confirmation des lois de Kirchhoff sur des résistances couplées en série.
- Détermination de la résistance totale du montage en série.
- Confirmation des lois de Kirchhoff sur des résistances couplées en parallèle.
- Détermination de la résistance totale du montage en parallèle.

## OBJECTIF

Mesures de tension et de courant sur des circuits de résistances montés en série et en parallèle

## RESUME

Les lois de Kirchhoff jouent un rôle fondamental dans le calcul des courants et tensions partiels de circuits électriques à ramifications. Cette expérience a pour objectif de démontrer les lois de Kirchhoff par le biais de la mesure de courants et de tensions partiels dans des résistances couplées en série et en parallèle.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Plaque pour composants  | 1012902    |
| 1      | Résistance 220 Ω, 2 W, P2W19                                  | 1012912    |
| 1      | Résistance 330 Ω, 2 W, P2W19                                  | 1012913    |
| 1      | Résistance 470 Ω, 2 W, P2W19                                  | 1012914    |
| 1      | Résistance 1 kΩ, 2 W, P2W19                                   | 1012916    |
| 1      | Résistance 6,8 kΩ, 2 W, P2W19                                 | 1012921    |
| 1      | Résistance 10 kΩ, 0,5 W, P2W19                                | 1012922    |
| 1      | Résistance 100 kΩ, 0,5 W, P2W19                               | 1012928    |
| 1      | Jeu de 10 connecteurs de shuntage, P2W19                      | 1012985    |
| 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 analogique AM50                                    | 1003073    |
| 1      | Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 1 mm <sup>2</sup> | 1002840    |

1

## GENERALITES

Gustav Robert Kirchhoff a formulé en 1845 les lois qui décrivent le rapport entre les courants et les tensions dans les circuits électriques composés de plusieurs circuits partiels. Sa loi des noeuds stipule qu'à chaque noeud de ramification d'un circuit électrique, la somme des intensités des courants qui entrent par un noeud est égale à la somme des intensités des courants qui en sortent. La loi des mailles stipule que dans chaque circuit partiel fermé – c.-à-d. dans chaque maille d'un réseau – la somme des tensions partielles appliquées aux conducteurs est égale à la tension totale de la source de tension. On définit un sens de rotation pour les mailles. Les courants qui circulent dans le sens de rotation et les tensions qui engendrent des courants ayant le même sens, sont considérés comme positifs. Dans le cas contraire, ils sont considérés comme négatifs. Ces lois peuvent par exemple s'appliquer à des circuits de résistances montées en série ou à des montages en parallèle.

Pour un montage en parallèle de  $n$  résistances l'intensité de courant  $I$  est identique à chaque point du circuit électrique. Selon la loi des mailles, la somme des tensions partielles appliquées aux résistances est identique à la tension de la source de courant mise sur circuit.

$$(1) \quad U = U_1 + \dots + U_n$$

Il en résulte pour la résistance totale  $R_{ser}$  :

$$(2) \quad R_{ser} = \frac{U}{I} = \frac{U_1 + \dots + U_n}{I} = R_1 + \dots + R_n$$

Dans un montage en parallèle de résistances, des noeuds de courants électriques sont générés. Des mesures réalisées aux noeuds permettent de déduire que la somme des intensités des courants entrant est identique à la somme des intensités des courants sortant. La tension appliquée à chaque noeud est identique. La loi des noeuds permet de calculer des courants inconnus à un noeud donné. La somme des courants partiels circulant à travers chacune des résistances est égale au courant total  $I$  et il en résulte :

$$(3) \quad I = I_1 + \dots + I_n$$

Pour la résistance totale  $R_{par}$ , on a donc :

$$(4) \quad \frac{1}{R_{par}} = \frac{I}{U} = \frac{I_1 + \dots + I_n}{U} = \frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

L'expérience donne lieu à l'étude d'un montage en série et d'un montage en parallèle de trois résistances. La confirmation des lois de Kirchhoff s'effectue par le biais de la mesure du courant total et des courants partiels ainsi que de la tension totale et des tensions partielles.

## EVALUATION

La résistance totale  $R$  est calculée à partir des valeurs mesurées sur le montage en série et sur le montage en parallèle, puis comparée avec la valeur théorique de l'équation (2) et (4).

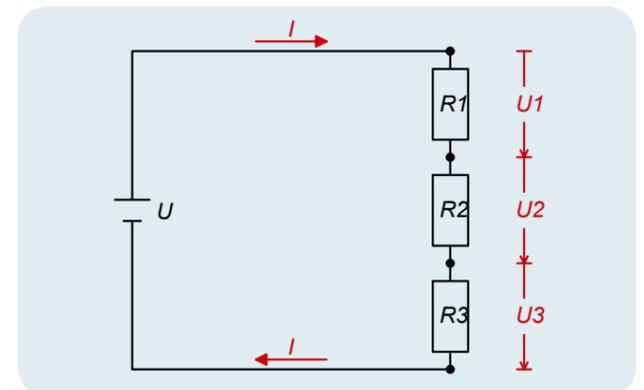


Fig. 1 Représentation schématique des lois de Kirchhoff pour un montage de résistances en série

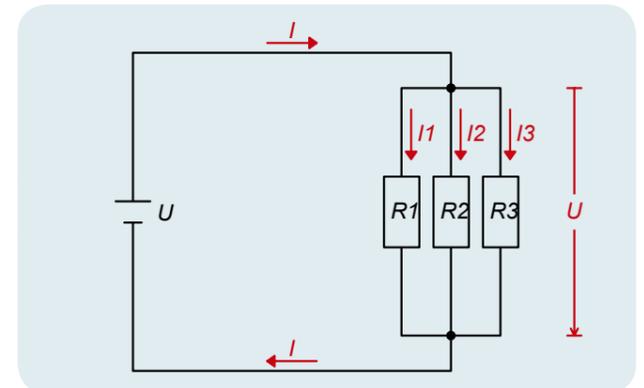
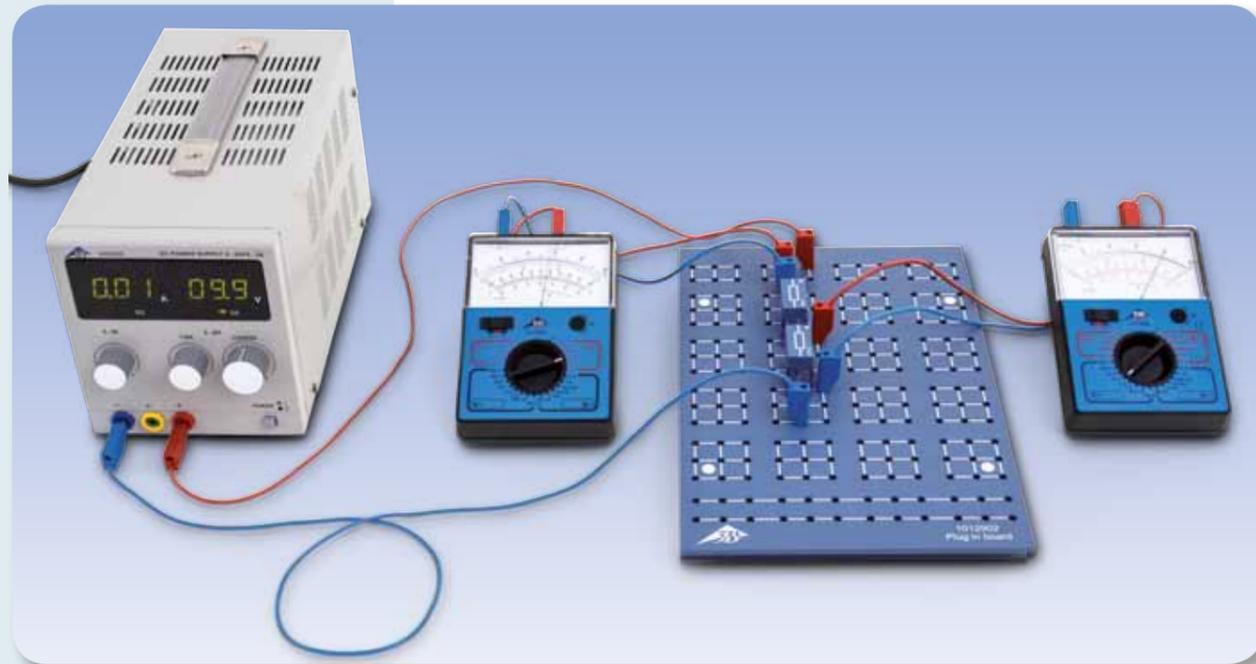


Fig. 2 Schéma des connexions d'un montage de résistances en parallèle



## EXERCICES

- Mesures de tension et de courant aux bornes d'un pont diviseur de tension à vide en fonction de la résistance partielle  $R_2$ .
- Mesures de tension et de courant aux bornes d'un pont diviseur de tension à vide avec une résistance totale constante  $R_1 + R_2$ .
- Mesures de tension et de courant aux bornes d'un pont diviseur de tension chargé en fonction de la résistance de charge  $R_L$ .

## OBJECTIF

Mesures de tension et de courant d'un pont diviseur de tension chargé et non chargé

## RESUME

Un diviseur de tension est composé dans le plus simple des cas de deux résistances connectées en série qui divisent la tension principale en deux tensions partielles. On dit qu'un pont diviseur de tension est chargé lorsqu'on est en présence d'une résistance supplémentaire en dérivation sur l'une des deux résistances, qui représente la charge fixe. Comme pour tous les montages en série et en parallèle, les valeurs du courant partiel et de la tension partielle en sortie sont calculées d'après les lois de Kirchhoff. Dans le cas d'un pont diviseur de tension non chargé (à vide), la tension partielle est fonction de la valeur de la résistance et varie entre zéro et la tension principale. Une différence notable existe dans le cas d'un pont diviseur chargé comportant de très petites résistances de charge : dans ce cas, la tension partielle aura des valeurs très faibles, indépendamment de la valeur de la résistance de charge.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Plaque de connexion des composants                            | 1012902    |
| 1      | Résistance 47 $\Omega$ , 2 W, P2W19                           | 1012908    |
| 2      | Résistance 100 $\Omega$ , 2 W, P2W19                          | 1012910    |
| 1      | Résistance 150 $\Omega$ , 2 W, P2W19                          | 1012911    |
| 1      | Résistance 470 $\Omega$ , 2 W, P2W19                          | 1012914    |
| 1      | Potentiomètre 220 $\Omega$ , 3 W, P4W50                       | 1012934    |
| 1      | Alimentation CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)           | 1003312 ou |
| 1      | Alimentation CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)           | 1003311    |
| 2      | Multimètre analogique AM50                                    | 1003073    |
| 1      | Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 1 mm <sup>2</sup> | 1002840    |

## GENERALITES

Un pont diviseur de tension est composé dans le plus simple des cas de deux résistances connectées en série qui divisent la tension principale en deux tensions partielles. On dit qu'un pont diviseur de tension est chargé lorsqu'on est en présence d'une résistance en parallèle sur l'une des deux composant le pont diviseur, qui représente la charge fixe. Comme pour tous les montages en série et en parallèle, les courants partiels et les tensions partielles sont calculés à l'aide des lois de Kirchhoff.

Dans le cas d'un diviseur de tension à vide, la tension principale se calcule ainsi (voir Fig. 1)

$$(1) \quad R = R_1 + R_2$$

Les deux résistances sont traversées par le même courant

$$(2) \quad I = \frac{U}{R_1 + R_2}$$

U : Tension principale

Par conséquent, la tension partielle aux bornes de la résistance  $R_2$  diminue :

$$(3) \quad U_2 = I \cdot R_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Dans le cas d'un pont diviseur de tension chargé, il faut également prendre en compte la résistance de charge  $R_C$  (voir Fig. 2) et, dans les équations ci-dessus, remplacer la résistance  $R_2$  par

$$(4) \quad R_p = \frac{R_2 \cdot R_L}{R_2 + R_L}$$

Pour la tension  $U_2$  aux bornes de la résistance  $R_2$ , on a alors :

$$(5) \quad U_2 = I \cdot R_p = U \cdot \frac{R_p}{R_1 + R_p}$$

Dans l'expérience, le diviseur de tension non chargé est réalisé au moyen de deux résistances discrètes  $R_1$  et  $R_2$ , et on utilise des valeurs différentes pour  $R_2$ . Une autre solution consiste à utiliser un potentiomètre, où la résistance totale  $R_1 + R_2$  est obligatoirement constante et où la valeur de la résistance partielle  $R_2$  est déterminée par la position du curseur. La source de tension fournit une tension constante  $U$  qui reste la même tout au long de l'expérience. On mesure le courant partiel et la tension partielle à chaque section du circuit.

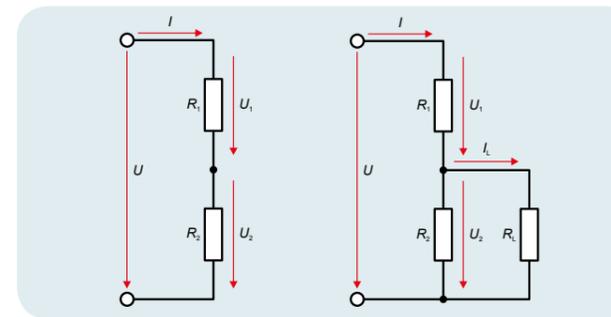


Fig. 1 Montage électrique d'un pont diviseur de tension à vide

Fig. 2 Montage électrique d'un pont diviseur de tension chargé

## EVALUATION

Dans le cas d'un pont diviseur de tension à vide, la tension partielle  $U_2$  est égale à la tension principale  $U$  lorsque  $R_2$  est nettement plus grande que  $R_1$ , et elle tend vers zéro quand la résistance  $R_2$  est très petite. Dans un pont diviseur de tension chargé qui met en jeu des charges élevées, la résistance de la section parallèle du circuit  $R_p = R_2$  et la tension partielle  $U_2$  se déduit de (3) : il existe une différence notable d'avec le diviseur de tension non chargé comportant de très petites résistances de charge : on a alors  $R_p = R_L$ , car le courant traverse principalement la résistance de charge, et la tension partielle  $U_2$  atteint des valeurs très petites indépendamment de  $R_2$ .

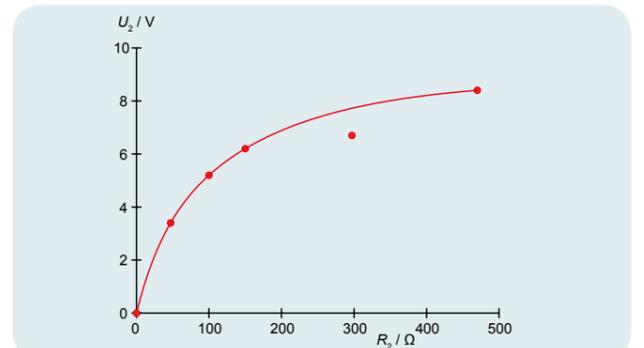


Fig. 3 Dans un pont diviseur de tension non chargé, la tension partielle  $U_2$  est fonction de la valeur ohmique de la résistance partielle  $R_2$

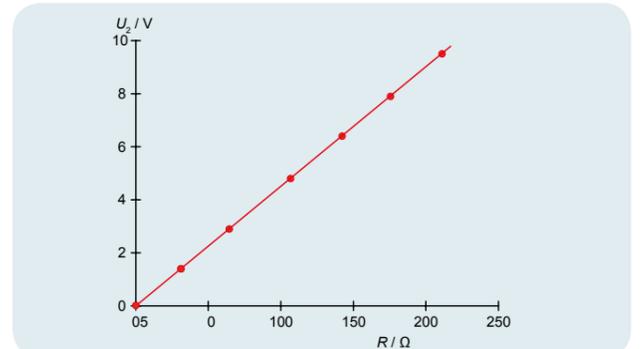


Fig. 4 Dans un pont diviseur de tension non chargé alimenté par une tension principale constante  $R_1 + R_2$ , la tension partielle  $U_2$  est fonction de la valeur de  $R_2$

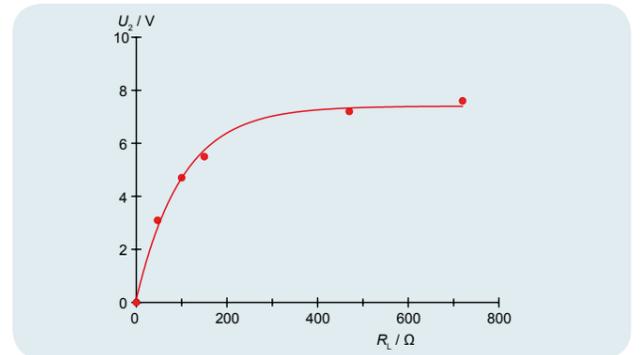


Fig. 5 Dans un pont diviseur de tension chargé, la tension de sortie  $U_2$  est fonction de la valeur ohmique de la résistance de charge  $R_L$



## EXERCICES

- Production d'hydrogène par électrolyse et mesure du volume d'hydrogène  $V$ .
- Mesure du travail électrique requis  $W$  à tension fixe  $U_0$ .
- Calcul de la constante  $F$  de Faraday.

## OBJECTIF

Détermination de la constante de Faraday

## RESUME

Pour déterminer la constante de Faraday, une certaine quantité d'hydrogène et d'oxygène est produite par électrolyse de l'eau. Ce faisant, on mesure la charge transportée.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre                            | Appareil  | Référence  |
|-----------------------------------|---|------------|
| 1                                 | Voltamètre de Hofmann   | 1002899    |
| 1                                 | Mesureur de puissance et d'énergie avec interface (230 V, 50/60 Hz) | 1003132 ou |
|                                   | Mesureur de puissance et d'énergie avec interface (115 V, 50/60 Hz) | 1003131    |
| 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    |
| 1                                 | Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 1 mm <sup>2</sup>       | 1002840    |
| <b>Environnement nécessaire :</b> |   |            |
| Acide sulfurique, 1 mol/l         |   |            |

## GENERALITES

On désigne par **électrolyse** la décomposition d'une substance chimique sous l'effet du courant électrique. Le phénomène de conductibilité électrique est donc lié au dépôt d'une substance, la charge transportée  $Q$  et la quantité de matière déposée  $n$  étant proportionnelles l'une par rapport à l'autre. La constante de proportionnalité est désignée comme **constante de Faraday  $F$**  et constitue une constante naturelle universelle.

Plus exactement, en ce qui concerne la proportionnalité entre la charge  $Q$  et le nombre de moles  $n$  de la quantité de matière déposée, il convient de tenir également compte de la valence  $z$  des ions déposés. On a l'équation

$$(1) \quad Q = F \cdot n \cdot z$$

La constante de Faraday peut donc être calculée, pour une valence connue, en mesurant la charge  $Q$  et le nombre de moles  $n$  d'une réaction électrolytique.

Dans le cadre de l'expérience, une quantité donnée d'hydrogène et d'oxygène est produite par électrolyse de l'eau. Pour déterminer la charge transportée  $Q$ , on mesure le travail électrique

$$(2) \quad W = Q \cdot U_0$$

nécessaire pour l'électrolyse, à tension constante  $U_0$ .

Le nombre de moles  $n_H$  des ions d'hydrogène déposés est calculé à partir du volume d'hydrogène recueilli  $V_{H_2}$  à la température ambiante  $T$  et à la pression externe  $p$ . Ce faisant, il faut toutefois tenir compte du fait que l'hydrogène est recueilli sous forme moléculaire et que, pour chaque molécule d'hydrogène captée, deux ions d'hydrogène sont déposés. De l'équation caractéristique du gaz parfait, on peut donc déduire :

$$(3) \quad n_H = 2 \cdot \frac{p \cdot V_{H_2}}{R \cdot T}$$

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

## EVALUATION

Pour la valence des ions d'hydrogène, on a  $z_H = 1$ . A partir des équations (1), (2) et (3), on obtient ainsi l'équation conditionnelle

$$F = \frac{W}{U_0} \cdot \frac{R \cdot T}{2 \cdot p \cdot V_{H_2} \cdot n_H} = \frac{W}{U_0} \cdot \frac{R \cdot T}{2 \cdot p \cdot V_{H_2}}$$

A titre de comparaison, il est également possible de déterminer le volume  $V_{O_2}$  de l'oxygène recueilli. Il correspond seulement à la moitié du volume d'hydrogène, étant donné que deux ions d'hydrogène et un ion d'oxygène sont déposés par molécule d'eau. La valence des ions d'oxygène est néanmoins de  $z_O = 2$ .

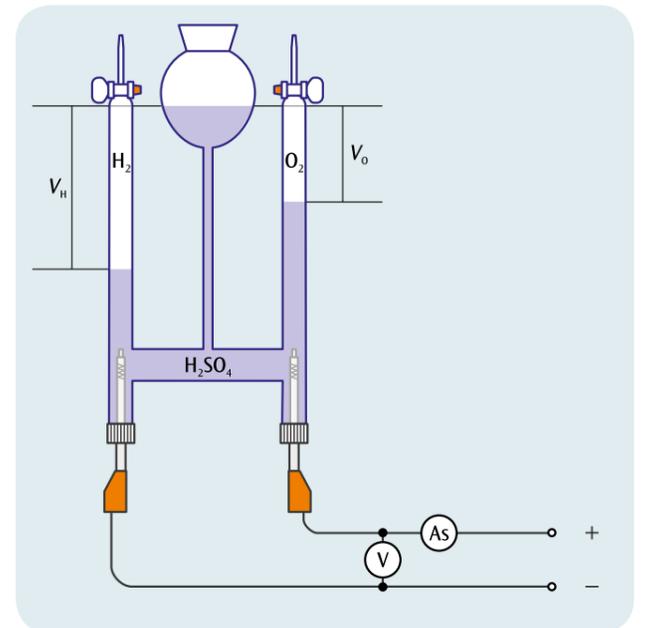
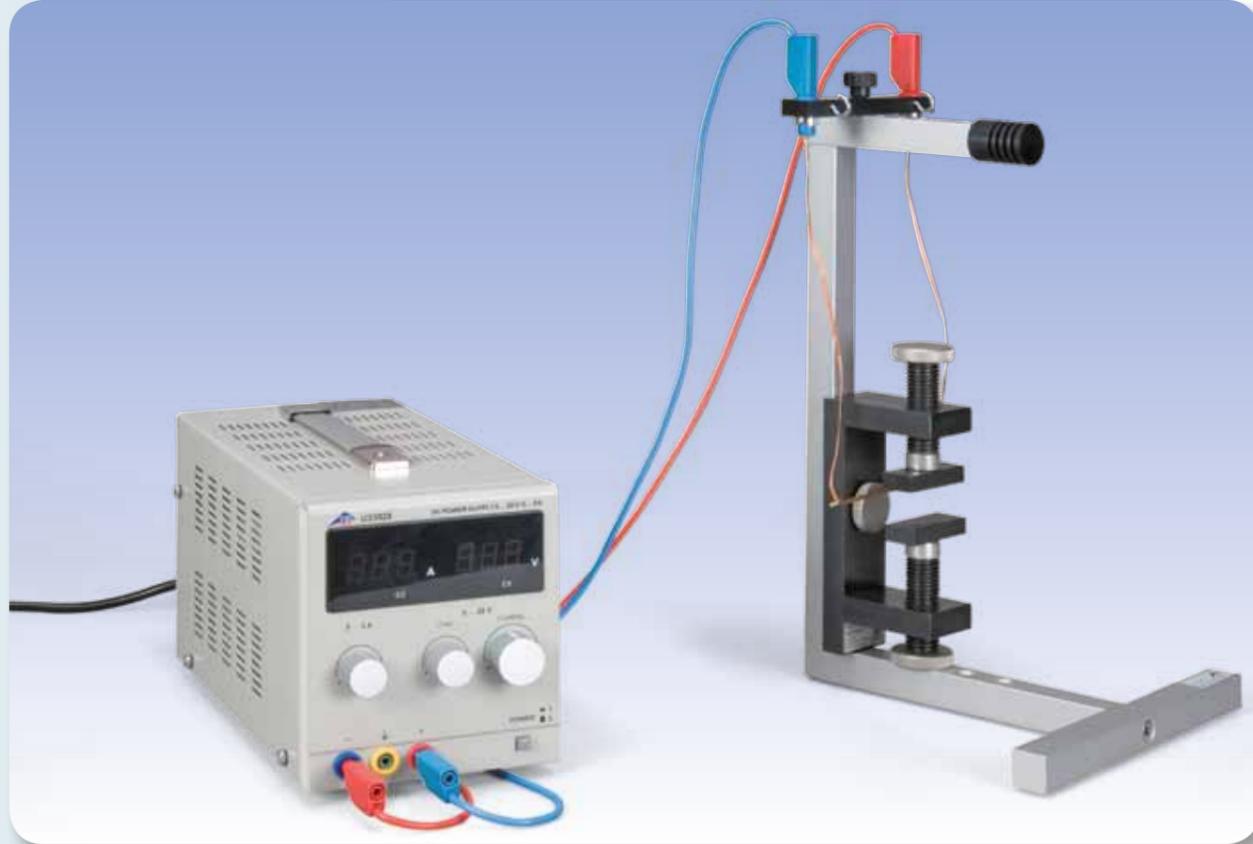


Fig. 1 Représentation schématique



## EXERCICES

- Détermination du sens de la force de Lorentz.
- Détermination de la force en fonction du courant électrique.
- Détermination de la force en fonction de la longueur efficace du conducteur.
- Détermination de la force en fonction de la distance entre les épanouissements polaires de l'aimant permanent.

## OBJECTIF

Mesure de la force exercée sur un conducteur électriquement chargé dans un champ magnétique

## RESUME

La force de Lorentz est mesurée sur une barre de cuivre conductrice suspendue à l'horizontale, comme une balançoire, à deux lignes d'alimentation verticales dans un champ magnétique. Après mise en circuit du courant, la barre est déviée à un angle, à partir duquel on calcule la force de Lorentz. L'intensité du courant varie en fonction du conducteur, du champ magnétique et de la longueur efficace du conducteur dans le champ magnétique.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Ensemble « Électromagnétisme »                      | 1002661    |
| 1      | Aimant permanent avec écart de pôles réglable       | 1002660    |
| 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    |
| 1      | Paire de cordons de sécurité, 75cm, rouge/bleu      | 1017718    |

1

## GENERALITES

Les électrons en mouvement dans un champ magnétique subissent une déviation verticale par rapport au champ magnétique et au sens du mouvement. La force déviante – ou force de Lorentz – exercée sur chaque électron ne peut toutefois être mesurée compte tenu de son extrême faiblesse, même dans un champ magnétique de forte intensité et à vitesse élevée de l'électron. La situation est différente si l'on introduit un conducteur électriquement chargé dans un champ magnétique homogène. De nombreux porteurs de charge se déplacent dans le conducteur à une même vitesse de déplacement  $v$ . Une force qui résulte de la somme de toutes les forces de Lorentz sur les différents porteurs de charge s'exerce alors sur le conducteur.

Si dans un conducteur rectiligne électriquement chargé de longueur  $L$  et de section  $A$

$$(1) \quad N = n \cdot A \cdot L$$

$n$ : Densité numérique

les électrons se déplacent à une vitesse  $v$  en direction du conducteur, le courant qui traverse le conducteur est

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

$e$ : Charge élémentaire

Si le conducteur se trouve dans un champ magnétique  $B$ , la force de Lorentz s'exerce sur tous les électrons en mouvement

$$(3) \quad F = N \cdot e \cdot v \times B$$

Si le conducteur est orienté à la verticale par rapport au champ magnétique, l'équation (3) peut être ramenée à

$$(4) \quad F = I \cdot B \cdot L$$

$F$  étant orientée à la verticale par rapport au conducteur et à la verticale par rapport au champ magnétique. Au cours de l'expérience, la force de Lorentz  $F$  est mesurée sur une barre de cuivre conductrice suspendue à l'horizontale, comme une balançoire, à deux lignes d'alimentation verticales dans un champ magnétique (cf. fig. 1). Après mise en circuit du courant, la barre est déviée d'un angle  $\varphi$  par la force de Lorentz  $F$ ; il en résulte pour  $F$  l'équation conditionnelle

$$(5) \quad F = m \cdot g \cdot \tan \varphi$$

$m = 6,23 \text{ g}$ : Masse de la barre de cuivre

Le champ magnétique  $B$  est produit par un aimant permanent dont la distance entre les épanouissements polaires  $d$  peut varier pour modifier  $B$ . Si l'on tourne les épanouissements polaires à  $90^\circ$ , on peut en outre modifier leur largeur  $b$  dans le sens du conducteur et, ainsi, la longueur efficace  $L$  du conducteur dans le champ magnétique. La longueur efficace  $L$  du conducteur est un peu plus grande que la largeur  $b$  des épanouissements polaires, étant donné que le champ magnétique non homogène « déborde » des épanouissements et ce, d'autant plus que l'écart  $d$  entre les épanouissements est important. En bonne approximation, on a

$$(6) \quad L = b + d$$

## EVALUATION

L'angle  $\varphi$  se calcule à partir de la longueur du pendule  $s$  et de la déviation horizontale  $x$  de la barre de cuivre :

$$\frac{x}{\sqrt{s^2 - x^2}} = \tan \varphi$$

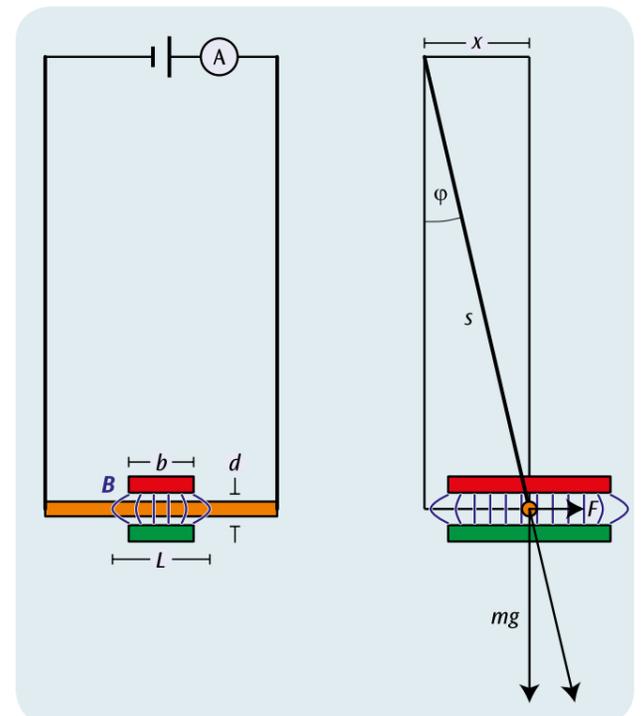


Fig. 1 Montage de mesure observé latéralement et de face

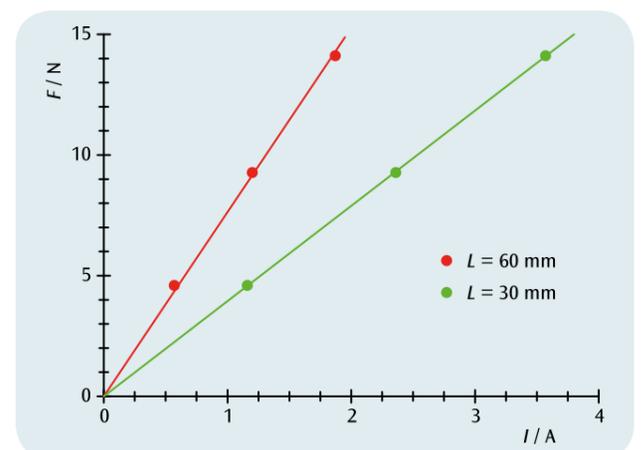


Fig. 2 Force exercée sur un conducteur électriquement chargé en fonction de l'intensité du courant  $I$  pour deux longueurs de conducteur différentes  $L$ . Les pentes des droites d'origine dessinées sont proportionnelles à  $L$



## EXERCICES

- Déterminer la densité de flux magnétique  $B$  dans une bobine cylindrique en fonction de l'intensité électrique  $I$ .
- Mesurer la densité de flux magnétique  $B$  dans une bobine cylindrique de densité d'enroulement variable en fonction de l'intensité électrique  $I$ .
- Confirmer la proportionnalité à la densité d'enroulement pour de grandes longueurs.

## OBJECTIF

Déterminer le champ magnétique de bobines cylindriques (solénoïdes) de différentes longueurs

## RESUME

La densité de flux magnétique à l'intérieur d'une longue bobine cylindrique est directement proportionnelle au courant de la bobine et à la densité d'enroulement, mais indépendante du rayon de la bobine, tant que la longueur de la bobine est sensiblement supérieure à son diamètre. Nous allons le vérifier dans l'expérience à l'aide de deux bobines de diamètres différents ainsi que d'une bobine de densité d'enroulement variable.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Bobine de champ 100 mm  | 1000591    |
| 1      | Bobine de champ 120 mm  | 1000592    |
| 1      | Bobine à densité de spires variable                             | 1000965    |
| 1      | Support pour bobines cylindriques                               | 1000964    |
| 1      | Teslamètre 200 mT (230 V, 50/60 Hz)                             | 1003314 ou |
|        | Teslamètre 200 mT (115 V, 50/60 Hz)                             | 1003313    |
| 1      | Alimentation CC 1 – 32 V, 0 – 20 A (115 V, 50/60 Hz)            | 1012858 ou |
|        | Alimentation CC 1 – 32 V, 0 – 20 A (230 V, 50/60 Hz)            | 1012857    |
| 1      | Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 2,5 mm <sup>2</sup> | 1002841    |
| 1      | Socle de serrage, 1000 g  | 1002834    |
| 1      | Tige statif, 250 mm   | 1002933    |
| 1      | Noix universelle  | 1002830    |
| 1      | Pince universelle   | 1002833    |

1

## GENERALITES

La loi de Biot et Savart décrit le rapport entre la densité de flux magnétique  $B$  et le courant électrique  $I$  traversant un conducteur de géométrie quelconque. Le calcul porte sur des particules infinitésimales du conducteur par rapport à la densité de flux magnétique totale. Le champ total est calculé par intégration via la géométrie du conducteur. Dans certains cas, par ex. avec une longue bobine cylindrique, on peut indiquer une solution analytique simple.

Selon la loi de Biot et Savart, un élément de conducteur infinitésimal  $ds$  traversé par un courant  $I$  génère la densité de flux magnétique à l'endroit  $r$ .

$$(1) \quad dB(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \cdot \frac{ds \times r}{r^3}$$

$B$ : densité de flux magnétique

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} : \text{perméabilité du vide}$$

À l'intérieur de la bobine cylindrique, la densité de flux magnétique est parallèle à l'axe du cylindre :

$$(2) \quad B = \mu_0 \cdot \frac{N}{L} \cdot I$$

$N$ : nombre de spires,  $L$ : longueur de bobine

tant que la longueur de la bobine est sensiblement supérieure à son rayon. La densité de flux magnétique dépend donc du diamètre de bobine et est proportionnelle à la densité d'enroulement, au nombre de spires par unité de longueur et au courant traversant la bobine.

Dans l'expérience, avec un teslamètre, nous allons mesurer la densité de flux magnétique au centre de longues bobines avec des courants allant jusqu'à 20 A. Nous allons démontrer l'indépendance vis-à-vis du diamètre de bobine ainsi que la proportionnalité avec le courant et la densité d'enroulement. Pour ce dernier, nous disposons d'une bobine à densité d'enroulement variable.

## EVALUATION

Les mesures confirment dans tous les cas la proportionnalité de la densité de flux magnétique  $B$  avec le courant  $I$  traversant la bobine. La proportionnalité avec la densité d'enroulement est confirmée tant que la longueur de la bobine est supérieure au triple du rayon de la bobine.



Fig. 1 Bobine de densité d'enroulement variable

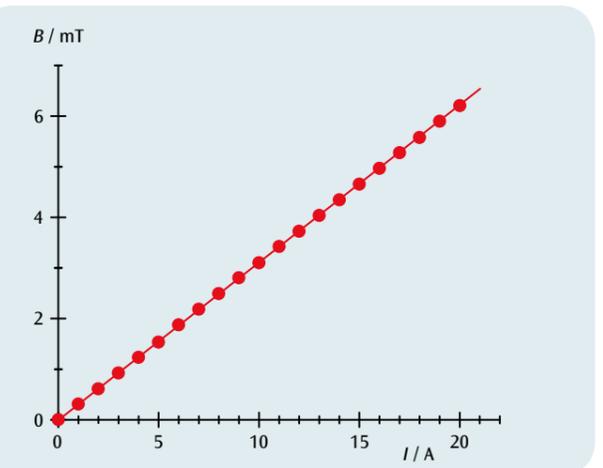


Fig. 2 Densité de flux magnétique  $B$  en fonction du courant  $I$

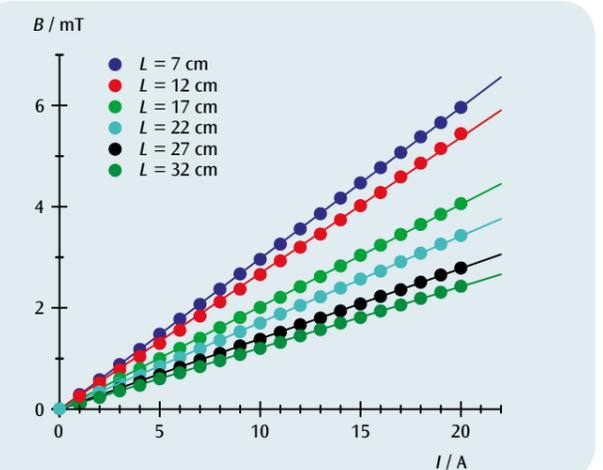


Fig. 3 Densité de flux magnétique  $B$  en fonction du courant  $I$  pour la bobine à densité d'enroulement variable pour différentes longueurs de bobine  $L$

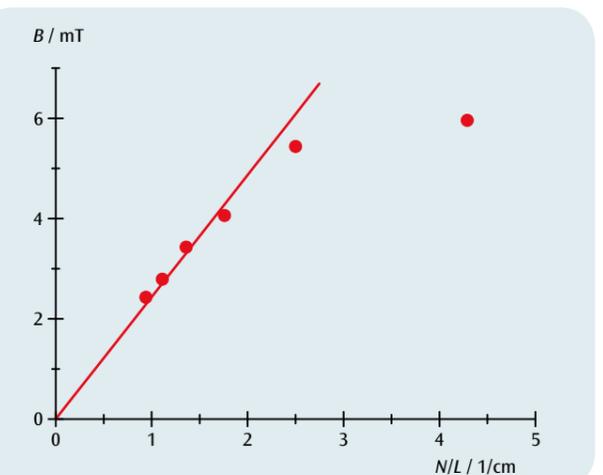


Fig. 4 Densité de flux magnétique  $B$  en fonction de la densité d'enroulement  $N/L$  avec  $I = 20$  A



## EXERCICES

- Mesurer l'angle de rotation d'une aiguille de boussole orientée parallèlement à la composante horizontale du champ magnétique terrestre avec une superposition du champ magnétique horizontal d'une paire de bobines de Helmholtz.
- Déterminer la composante horizontale du champ magnétique terrestre.
- Mesurer l'inclinaison et déterminer la composante verticale et le montant total du champ magnétique terrestre.

## OBJECTIF

Déterminer les composantes horizontale et verticale du champ magnétique terrestre

## RESUME

Dans l'expérience, nous allons déterminer l'inclinaison et le montant ainsi que les composantes horizontale et verticale du champ magnétique terrestre sur le lieu de la mesure. La composante horizontale du champ magnétique terrestre est déterminée à partir de la rotation d'une aiguille de boussole avec une superposition du champ magnétique d'une paire de bobines de Helmholtz. La mesure de l'angle d'inclinaison permet ensuite de calculer la composante verticale et le montant total du champ magnétique terrestre.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Bobines de Helmholtz 300 mm                         | 1000906    |
| 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    |
| 1      | Multimètre numérique P1035                          | 1002781    |
| 1      | Boussole d'inclinaison et de déclinaison            | 1006799    |
| 1      | Rhéostat à curseur 100 Ω                            | 1003066    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm                | 1002843    |

2

## GENERALITES

La Terre est entourée d'un champ magnétique qui est généré par ce qu'on appelle la « géodynamique ». À proximité de la surface terrestre, il ressemble au champ d'un dipôle magnétique, les lignes du champ sortant par l'hémisphère Sud et rentrant par l'hémisphère Nord. L'angle entre le sens du champ magnétique terrestre et l'horizontale est appelé « inclinaison ». La composante horizontale du champ magnétique terrestre est grosso modo parallèle à l'orientation géographique Nord-Sud. Comme la croûte terrestre ne présente pas une magnétisation uniforme sur toute sa surface, on observe des divergences locales, appelées « déclinaison ».

Dans l'expérience, nous allons déterminer l'inclinaison et la déclinaison ainsi que les composantes horizontale et verticale du champ magnétique terrestre sur le lieu de la mesure.

On a les expressions suivantes :

$$(1) \quad B_v = B_h \cdot \tan \alpha$$

$\alpha$ : inclinaison  
 $B_h$ : composante horizontale  
 $B_v$ : composante verticale

et

$$(2) \quad B = \sqrt{B_h^2 + B_v^2}$$

Il suffit donc de déterminer les grandeurs  $B_h$  et  $\alpha$ , car les deux autres peuvent être définies par le calcul.

L'inclinaison  $\alpha$  est déterminée avec une boussole d'inclinaison. Pour déterminer la composante horizontale  $B_h$ , la même boussole d'inclinaison est orientée à l'horizontale de manière à ce que son aiguille, qui se stabilise parallèlement à la composante horizontale, indique  $0^\circ$ . Une paire de bobines de Helmholtz génère en outre un champ magnétique horizontal  $B_{HH}$  perpendiculairement à  $B_h$  et tourne par conséquent l'aiguille de la boussole dans un angle  $\beta$ . Conformément à la Fig. 1, on a

$$(3) \quad \frac{B_{HH}}{B_h} = \tan \beta.$$

Cette mesure est réalisée pour améliorer la précision pour différents angles  $\beta$ .

## EVALUATION

À partir de (3), on obtient

$$B_{HH} = B_h \cdot \tan \beta.$$

La composante horizontale  $B_h$  est donc la pente d'une droite passant par l'origine par les points de mesure dans un diagramme  $B_{HH} \cdot \tan \alpha$ . Il est facile de déterminer le champ magnétique  $B_{HH}$  de la paire de bobines de Helmholtz. À l'intérieur de la paire de bobines, il est très homogène et proportionnel à l'intensité de courant  $I$  parcourant une seule bobine :

$$B_{HH} = k \cdot I \text{ avec}$$

$$k = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \frac{N}{R}$$

$N = 124$ : nombre de spires,  $R = 147,5$  mm: rayon

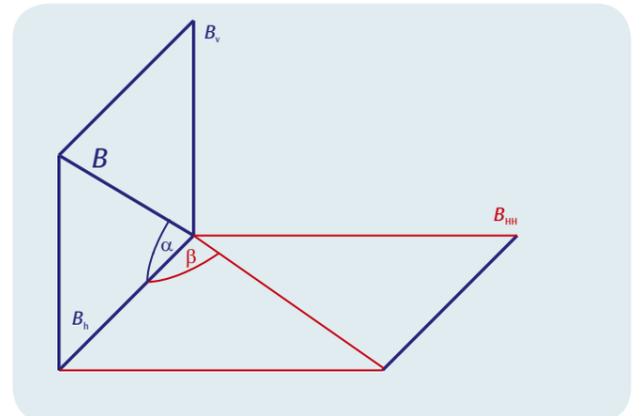


Fig. 1 Représentation des composantes des champs magnétiques étudiés dans l'expérience et définition des angles correspondants

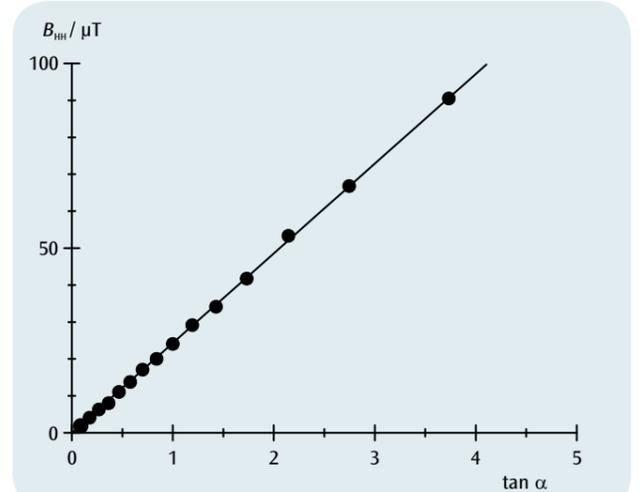
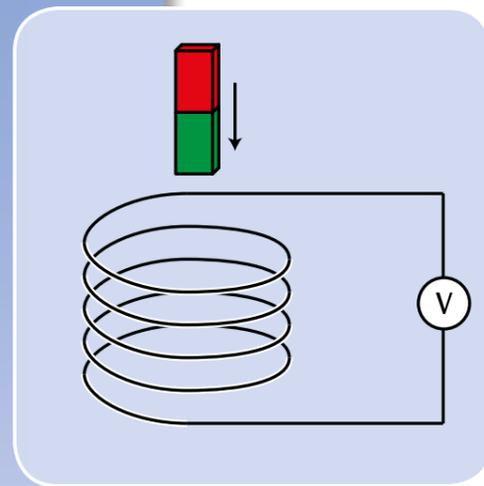


Fig. 2 Diagramme  $B_{HH} \cdot \tan \alpha$  permettant de déterminer la composante horizontale du champ magnétique terrestre



### OBJECTIF

Production d'un pic de surtension dans une bobine conductrice à l'aide d'un aimant permanent en mouvement

### RESUME

Si un aimant permanent passe successivement à travers plusieurs bobines d'inductance de même construction couplées en série, une tension est induite dans chaque bobine. L'amplitude de cette tension augmente au passage de l'aimant d'une bobine à l'autre, compte tenu du fait que la vitesse de l'aimant s'accroît sans cesse. Le flux magnétique calculable par intégration à partir de la tension mesurée atteint cependant la même valeur pour toutes les bobines.

### DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                                       | Référence  |
|--------|--|------------|
| 1      | Tube à 6 bobines d'induction                   | 1001005    |
| 1      | 3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)                   | 1000540 ou |
|        | 3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)                   | 1000539    |
| 1      | 3B NETlab™                                     | 1000544    |
| 1      | Paire de cordons de sécurité, 75cm, rouge/bleu | 1017718    |

### EXERCICES

- Observation du mouvement d'un aimant permanent passant à travers plusieurs bobines d'inductance couplées en série.
- Mesure de l'allure temporelle de la tension induite.
- Calcul de l'allure temporelle du flux magnétique.

2

### GENERALITES

Chaque variation du flux magnétique traversant une bobine conductrice fermée induit une tension électrique dans celle-ci. Le mouvement d'un aimant permanent à travers une bobine conductrice fixe provoque par exemple une telle variation.

Dans ce cas, il est instructif de prendre en compte, outre la tension induite en fonction du temps

$$(1) \quad U(t) = - \frac{d\Phi}{dt}(t)$$

$\Phi$ : Flux magnétique

ce que l'on appelle le pic de surtension

$$(2) \quad \int_{t_1}^{t_2} U(t) \cdot dt = \Phi(t_1) - \Phi(t_2)$$

Il correspond à la différence entre le flux magnétique initial ( $t_1$ ) et le flux magnétique final ( $t_2$ ) du phénomène observé.

Dans le cadre de l'expérience, on fait passer un aimant permanent à travers un tube équipé de six bobines d'inductance identiques couplées en série. On enregistre l'allure temporelle de la tension induite (cf. figure 1). L'amplitude de cette tension augmente au passage de l'aimant d'une bobine à l'autre, compte tenu du fait que la vitesse de l'aimant s'accroît sans cesse.

Les surfaces sous tous les signaux de tension positifs et négatifs sont identiques, comme l'indique la valeur. Elles correspondent au flux maximum  $\Phi$  de l'aimant permanent à l'intérieur d'une seule bobine.

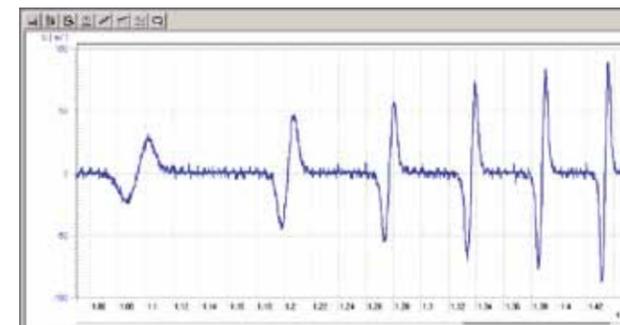


Fig. 1 Allure temporelle de la tension induite U

### EVALUATION

Le signe de polarité de la tension est défini de manière à ce qu'une tension négative soit induite pendant la phase de passage de l'aimant dans la bobine conductrice.

La tension induite revient à zéro lorsque l'aimant a atteint le centre de la bobine et que le flux magnétique atteint ainsi sa valeur maximale.

Pendant la phase de sortie de l'aimant hors de la bobine, une tension positive est induite.

A partir de la tension mesurée et en utilisant l'équation 2, et en intégrant le flux magnétique au temps  $t$ , on obtient le calcul suivant :

$$\Phi(t) = \Phi(0) - \int_0^t U(t') \cdot dt'$$

Il atteint la même valeur pour toutes les bobines aux incertitudes de mesures près (cf. figure 2).

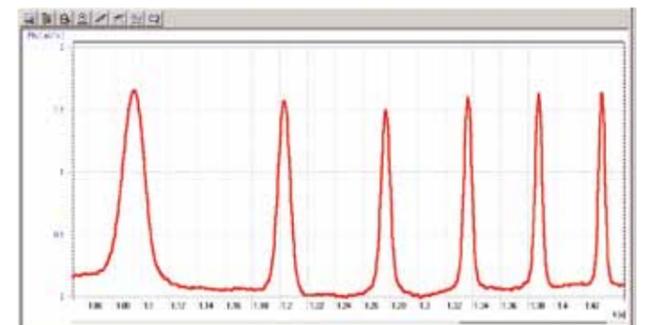
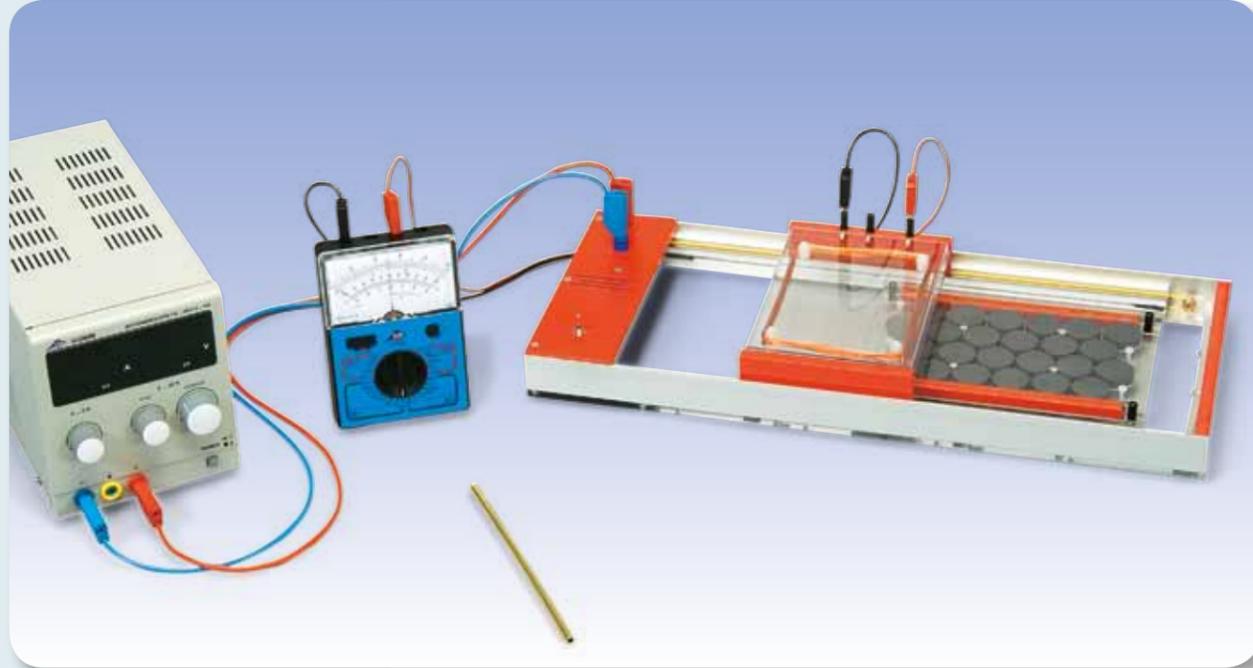


Fig. 2 Allure temporelle du champ magnétique

## UE3040200 INDUCTION DANS UNE BOUCLE CONDUCTRICE EN MOUVEMENT

UE3040200



## EXERCICES

- Mesure de la tension d'induction en fonction de la vitesse de la boucle conductrice.
- Mesure de la tension d'induction en fonction du nombre de spires de la boucle conductrice.
- Comparaison du signe de la tension d'induction lors de l'introduction et du retrait de la boucle conductrice.
- Comparaison du signe de la tension d'induction en cas de modification du sens de déplacement.
- Mesure de la tension d'induction dans une boucle conductrice de surface variable et à une spire.

## OBJECTIF

Mesure de la tension d'induction dans une boucle conductrice mue par un champ magnétique

## RESUME

La modification de flux nécessaire à l'induction d'une tension dans une boucle conductrice peut résulter d'un mouvement de la boucle conductrice. Pour obtenir cette situation, une boucle conductrice perpendiculaire à un champ magnétique homogène est introduite ou retirée à vitesse constante du champ magnétique. Dans le premier cas, le flux magnétique augmente avec la valeur, dans le second cas, il diminue, ainsi la tension induite change-t-elle son signe.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre                      | Appareil  | Référence  |
|-----------------------------|---|------------|
| 1                           | Inductomètre  | 1000968    |
| 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    |
| 1                           | Multimètre analogique AM50                          | 1003073    |
| 1                           | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm                | 1002843    |
| 1                           | Chronomètre incrémental mécanique                   | 1002810    |
| <b>En plus recommandé :</b> |   |            |
| 1                           | Amplificateur de mesure (230 V, 50/60 Hz)           | 1001022 ou |
|                             | Amplificateur de mesure (115 V, 50/60 Hz)           | 1001021    |

1

## GENERALITES

Par induction électromagnétique, on entend la formation d'une tension électrique le long d'une boucle conductrice causée par la modification du flux magnétique qui traverse la boucle conductrice. La modification du flux peut résulter d'un changement du champ magnétique ou d'un mouvement de la boucle conductrice.

Pour comprendre les différentes relations, on observe généralement une boucle conductrice en  $U$ , à transverse mobile, perpendiculaire à un champ magnétique  $B$  (voir fig. 1). Le flux magnétique passant par la surface limitée par la traverse est

$$(1) \quad \Phi = B \cdot a \cdot b$$

$a$ : Largeur,  $b$ : Longueur de la boucle

Lorsque la traverse est déplacée à vitesse  $v$ , le flux magnétique se modifie, car la longueur de la boucle conductrice se modifie. Le taux de modification

$$(2) \quad \frac{d\Phi}{dt} = B \cdot a \cdot v$$

peut être mesurée dans l'expérience comme tension

$$(3) \quad U = -B \cdot a \cdot v$$

dans la gamme des  $\mu\text{V}$ , à condition que l'amplificateur de mesure recommandé soit également utilisé.

La tension induite est nettement plus importante lorsque le champ magnétique est traversé par une boucle conductrice à nombreuses spires sur un cadre fixe. Tant que le cadre ne pénètre que partiellement dans le champ magnétique, on obtient la situation représentée dans la fig. 1. Le mouvement de la boucle conductrice entraîne un changement de flux

$$(4) \quad \frac{d\Phi_1}{dt} = B \cdot N \cdot a \cdot v$$

$N$ : Nombre de spires

qui peut être mesuré comme tension induite

$$(5) \quad U_1 = -B \cdot N \cdot a \cdot v$$

Dès que la boucle conductrice pénètre entièrement dans le champ magnétique, la tension redevient nulle. Cette situation ne change que lorsque la boucle conductrice ressort du champ magnétique. Le champ magnétique diminue alors et la tension induite modifie son signe, qui change également lorsque le sens de déplacement de la boucle conductrice est modifié.

Dans l'expérience, on varie la tension d'alimentation du moteur qui tire la boucle conductrice. Ainsi peut-on régler différentes vitesses constantes de la boucle conductrice. De plus, on peut inverser le sens de déplacement du moteur. Un prélèvement intermédiaire est également disponible, permettant de mesurer la tension induite pour trois nombres de spires  $N$  différents.

## EVALUATION

Le temps  $t$ , nécessaire à la boucle conductrice pour effectuer un passage complet, et la longueur correspondante du parcours  $L$  permettent de calculer la vitesse

$$v = \frac{L}{t}$$

Cette vitesse et la tension induite sont reportées dans un diagramme  $U-v$ . Les valeurs de mesure se situent sur une droite passant par l'origine (voir fig. 2).

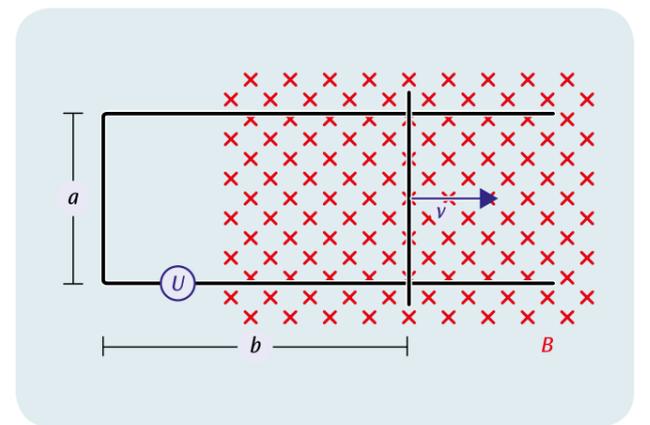


Fig. 1 Modification du flux magnétique par la modification de la surface de boucle

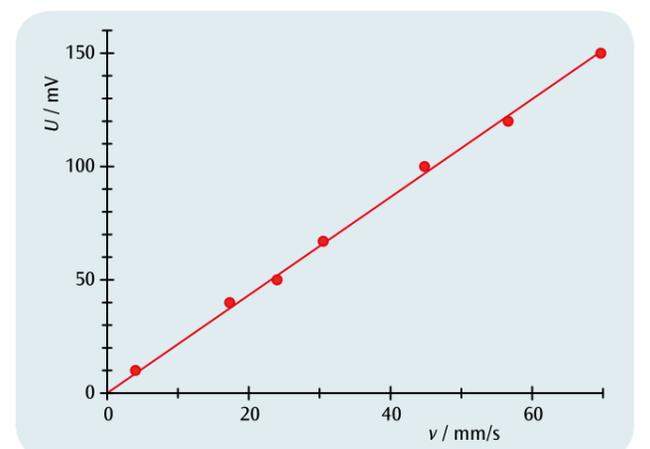


Fig. 2 Tension induite en fonction de la vitesse de la boucle conductrice


**OBJECTIF**

Démonstration et analyse du fonctionnement d'un frein à courants de Foucault

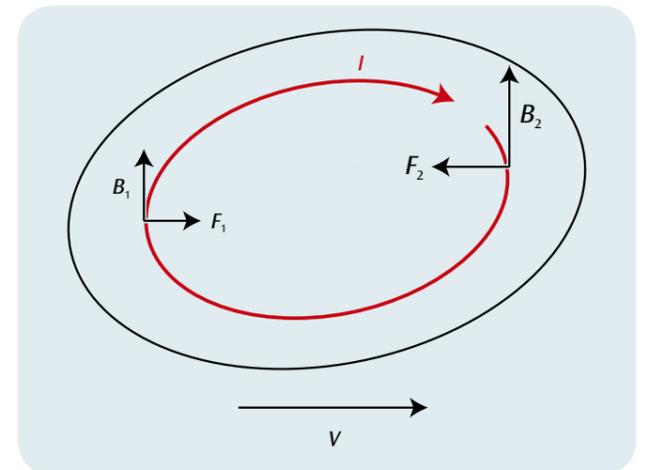
**RESUME**

Des courants de Foucault sont induits dans un disque métallique qui se déplace sous l'effet d'un champ magnétique inhomogène. Par ces courants de Foucault, le champ magnétique inhomogène exerce une force qui freine le mouvement du disque.

**GENERALITES**

Lorsqu'un disque métallique se déplace dans un champ magnétique inhomogène, le flux magnétique est modifié en permanence pour la section en question du disque et une tension annulaire est induite sur la circonférence de la section. Ainsi des courants de Foucault apparaissent partout dans le disque métallique. Dans le champ magnétique, ils subissent des forces de Lorentz qui freinent le mouvement du disque. Les courants de Foucault sont fortement réduits lorsque le disque métallique est doté de fentes, de sorte que le courant ne puisse passer d'une passerelle à une autre qu'en suivant des détours. Dans ce cas, le mouvement du disque n'est freiné que faiblement.

L'apparition et l'amortissement des courants de Foucault peuvent être démontrés de manière impressionnante sur un pendule de Waltenhofen. Il s'agit d'un disque métallique présentant quelques fentes et qui oscille dans un champ magnétique inhomogène.



Courant de Foucault  $I$  dans un disque métallique mû par un champ magnétique inhomogène  $B_1, B_2$  à une vitesse  $v$  et forces de Lorentz  $F_1$  et  $F_2$  exercées sur les deux branches du courant de Foucault. La force opposée au mouvement est supérieure à la force dans le sens du mouvement.

**EVALUATION**

Lorsque le côté sans fente du disque oscille sous l'effet du champ magnétique inhomogène, les oscillations sont amorties. Plus le champ magnétique est fort, plus l'amortissement est important. Des courants de Foucault sont induits à l'intérieur du disque métallique. Par ces courants de Foucault, le champ magnétique inhomogène exerce une force qui s'oppose au mouvement du disque (cf. règle de Lorentz).

Lorsque le côté à fentes du disque oscille sous l'effet du champ magnétique inhomogène, l'amortissement est faible, car les courants de Foucault ne peuvent se développer que faiblement.

**EXERCICES**

- Etude de l'amortissement des courants de Foucault d'un pendule de Waltenhofen dans le champ magnétique inhomogène.
- Démonstration de l'amortissement des courants de Foucault dans un disque métallique à fentes.

**1**
**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Pendule de Waltenhofen                              | 1000993    |
| 1      | Socle pour statif, trépied, 150 mm                  | 1002835    |
| 1      | Tige statif, 750 mm                                 | 1002935    |
| 1      | Noix universelle                                    | 1002830    |
| 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    |
| 1      | Noyau en U  | 1000979    |
| 1      | Paire d'épanouissements polaires                    | 1000978    |
| 1      | Paire de brides de serrage                          | 1000977    |
| 2      | Bobine D à 1200 spires                              | 1000989    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm                | 1002843    |



## EXERCICES

- Mesurer la tension secondaire en fonction de la tension primaire à vide avec un rapport de transformation fixe.
- Mesurer le courant primaire en fonction du courant secondaire en court-circuit avec un rapport de transformation fixe.
- Mesurer la tension primaire, le courant primaire, la tension secondaire et le courant secondaire avec une résistance de charge donnée.
- Déterminer les pertes en puissance et le rendement.

## OBJECTIF

Effectuer des mesures sur un transformateur à vide et en charge

## RESUME

Les transformateurs sont des convertisseurs de tension qui reposent sur la loi de Faraday concernant l'induction. Ils sont notamment utilisés pour la transmission de puissance électrique sur de grandes distances, afin de minimiser les pertes en ligne par la transformation en tensions si possibles élevées et en courants plus faibles. Dans l'expérience, les courants et tensions mesurés à vide, en court-circuit et en charge permettent de vérifier la proportionnalité directe et inversée du rapport entre la tension et le courant et le rapport de transformation ainsi que de calculer les pertes en puissance et le rendement.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil   | Référence  |
|--------|--|------------|
| 2      | Bobine pour petites tensions D                               | 1000985    |
| 1      | Noyau de transformateur D                                    | 1000976    |
| 1      | Alimentation CA/CC 1/ 2/ 3/ ... 15 V, 10 A (230 V, 50/60 Hz) | 1008691 ou |
|        | Alimentation CA/CC 1/ 2/ 3/ ... 15 V, 10 A (115 V, 50/60 Hz) | 1008690    |
| 3      | Multimètre numérique P3340                                   | 1002785    |
| 1      | Rhéostat à curseur 10 Ω                                      | 1003064    |
| 1      | Interrupteur bipolaire                                       | 1018439    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm                         | 1002843    |

## GENERALITES

Les transformateurs sont des convertisseurs de tension qui reposent sur la loi de Faraday concernant l'induction. Ils sont notamment utilisés pour la transmission de puissance électrique sur de grandes distances, afin de minimiser les pertes en ligne par la transformation en tensions si possibles élevées et en courants plus faibles.

Dans le cas le plus simple, un transformateur est constitué de deux bobines couplées : la bobine primaire avec le nombre de spires  $N_1$  et la bobine secondaire avec le nombre de spires  $N_2$ , qui renferment un noyau en fer commun. Le flux magnétique  $\Phi_1$  de la bobine primaire traversée par le courant  $I_1$  traverse complètement la bobine secondaire.

Par la suite, nous allons étudier le transformateur idéal, c'est-à-dire sans perte. Dans un transformateur à vide, le circuit secondaire n'est traversé par aucun courant, soit  $I_2 = 0$ . Une tension alternative  $U_1$  appliquée à la bobine primaire génère le courant à vide  $I_1$ , qui produit un flux magnétique  $\Phi_1$  et induit ainsi une tension  $U_{ind}$ . En raison de la loi des mailles de Kirchhoff, cette tension d'induction  $U_1 + U_{ind} = 0$  est égale et de sens opposé à  $U_1$  :

$$(1) \quad U_{ind} = -L_1 \cdot \frac{dI_1}{dt} = -N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} = -U_1.$$

$L_1$ : inductance de la bobine primaire

$\Phi_1$ : flux magnétique généré par  $I_1$

Comme le flux magnétique  $\Phi_1$  traverse complètement la bobine secondaire, il y induit une tension

$$(2) \quad U_2 = -N_2 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt}.$$

À partir de (1) et (2), on obtient enfin :

$$(3) \quad \frac{U_2}{U_1} = -\frac{N_2}{N_1}.$$

Le signe négatif indique que  $U_1$  et  $U_2$  sont déphasées de  $180^\circ$  lorsque le sens de l'enroulement est identique et en phase lorsque le sens de l'enroulement est opposé.

Dans un transformateur en charge, la bobine secondaire est traversée par un courant  $I_2 = U_2 / R$ ,  $R$  étant la résistance ohmique de la charge. Ce courant génère un flux magnétique  $\Phi_2$  qui, en raison de la loi de Lenz, est opposé au flux magnétique  $\Phi_1$  généré par le courant primaire  $I_1$ . Comme la tension primaire  $U_1$  reste constante, le courant primaire  $I_1$  augmente. Dans le cas idéal, la puissance  $P_2$  cédée par la bobine secondaire est égale à la puissance  $P_1$  absorbée par la bobine primaire :

$$(4) \quad P_1 = U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 = P_2.$$

Avec (3), il en résulte :

$$(5) \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}.$$

Dans l'expérience, on branche d'abord un voltmètre côté secondaire, puis on mesure à vide ( $I_2 = 0$ ) la tension secondaire  $U_{20}$  en fonction de la tension primaire  $U_{10}$  pour un rapport de transformation fixe  $N_1/N_2 = 1/2$ . Ensuite, on court-circuite le côté secondaire avec un ampèremètre ( $U_{2c} = 0$ ) et on mesure le courant primaire  $I_{1c}$  en fonction du courant secondaire  $I_{2c}$  pour un rapport de transformation  $N_1/N_2 = 1/2$ . Enfin, on branche une résistance de charge  $R = 2 \Omega$  côté secondaire et on mesure la tension primaire  $U_1$ , le courant primaire  $I_1$ , la tension secondaire  $U_2$  et le courant secondaire  $I_2$  pour un rapport de transformation fixe  $N_1/N_2 = 1/2$ .

## EVALUATION

L'équation (3) permet de déduire les tensions

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_1$$

et l'équation (5) les courants

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2$$

Ainsi, les pentes des droites dans les diagrammes des figures 2 et 3 sont déterminées par le rapport de transformation.

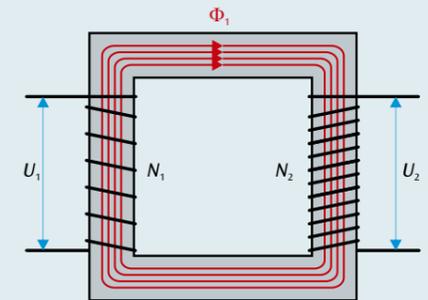


Fig. 1 Représentation schématique du transformateur

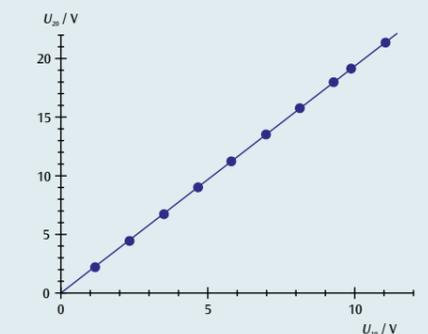


Fig. 2 Tension secondaire  $U_{20}$  en fonction de la tension primaire  $U_{10}$  à vide ( $I_{20} = 0$ ),  $N_1 = 36$ ,  $N_2 = 72$

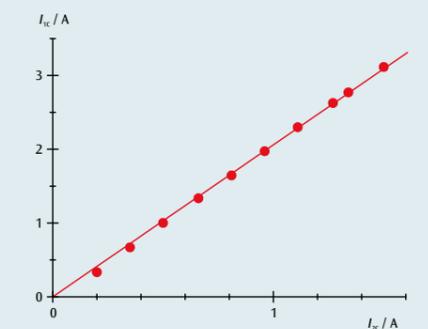
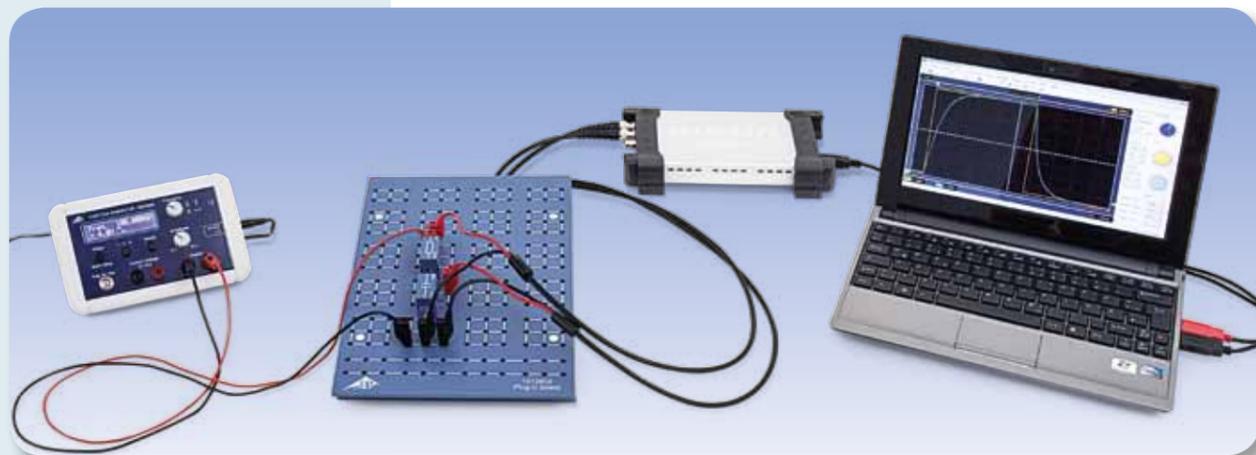


Fig. 3 Courant primaire  $I_{1c}$  en fonction du courant secondaire  $I_{2c}$  en cas de court-circuit ( $U_{2c} = 0$ ),  $N_1 = 36$ ,  $N_2 = 72$



## EXERCICES

- Mesurer la tension aux bornes d'un condensateur chargé et déchargé par allumage et extinction du circuit à tension continue.
- Déterminer le temps de demi-vie lors de la charge et de la décharge.
- Déterminer dans quelle mesure la demi-vie est fonction de la capacité et de la résistance.

## OBJECTIF

Étude de l'évolution de la tension aux bornes d'un condensateur lorsque celui-ci est traversé par un courant de charge et de décharge

## RESUME

En régime continu, le courant ne traverse le condensateur que lorsque le circuit est allumé ou éteint. Le condensateur est chargé par le courant à l'allumage du circuit jusqu'à ce que la tension appliquée soit atteinte, et déchargé à l'extinction du circuit jusqu'à ce que la tension soit nulle. L'évolution de la tension du condensateur peut être représentée comme fonction exponentielle, c.-à-d. que pendant la demi-vie  $T_{1/2}$ , la tension du condensateur évolue de la moitié. Il s'écoule le même laps de temps lors d'une chute de tension de la moitié à un quart et d'un quart à un huitième. Le temps de demi-vie est proportionnel à la capacité et à la résistance.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Plaque de connexion des composants                            | 1012902    |
| 1      | Résistance 470 Ω, 2 W, P2W19                                  | 1012914    |
| 1      | Résistance 1 kΩ, 2 W, P2W19                                   | 1012916    |
| 1      | Résistance 2,2 kΩ, 2 W, P2W19                                 | 1012918    |
| 3      | Condensateur 1 μF, 100 V, P2W19                               | 1012955    |
| 1      | Générateur de fonctions FG 100 (230 V, 50/60 Hz)              | 1009957 ou |
| 1      | 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      | Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 1 mm <sup>2</sup> | 1002840    |
| 1      | Jeu de 10 connecteurs de shuntage, P2W19                      | 1012985    |

1

## GENERALITES

En régime continu, le courant ne traverse le condensateur que lorsque le circuit est allumé ou éteint. Le condensateur est chargé par le courant à l'allumage du circuit jusqu'à ce que la tension appliquée soit atteinte, et déchargé à l'extinction du circuit jusqu'à ce que la tension soit nulle. L'évolution de la tension aux bornes du condensateur peut être représentée par une fonction exponentielle.

Pour un circuit en courant continu de capacité  $C$ , de résistance  $R$  et de tension continue  $U_0$ , on a à l'allumage du circuit :

$$(1) \quad U(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t \ln 2}{T_{1/2}}})$$

et à l'extinction du circuit :

$$(2) \quad U(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t \ln 2}{T_{1/2}}}$$

avec

$$(3) \quad T_{1/2} = \ln 2 \cdot R \cdot C$$

$T_{1/2}$  correspond au temps de demi-vie, c.-à-d. que pendant ce temps  $T_{1/2}$ , la tension du condensateur diminue de la moitié. Il s'écoule le même laps de temps lorsque la tension chute de la moitié à un quart et d'un quart à un huitième.

Ce phénomène est étudié à l'aide du montage expérimental. On enregistre l'allure temporelle de la tension aux bornes du condensateur à l'aide d'un oscilloscope à mémoire. Étant donné que la tension continue  $U_0$  est fixée à 8 V, il est facile de relever les valeurs de la moitié, du quart et du huitième de cette grandeur.

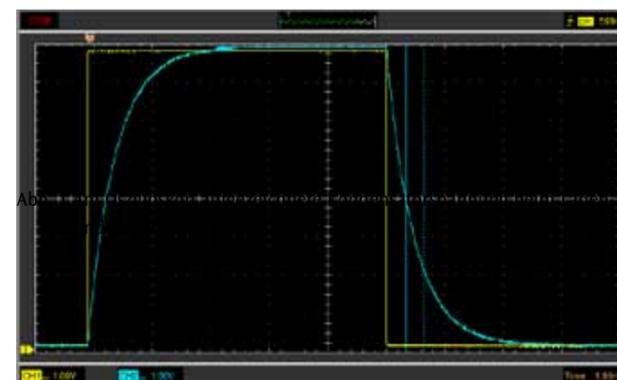


Fig. 1 Tension aux bornes du condensateur en charge et en décharge, enregistrée sur l'oscilloscope

## EVALUATION

La concordance des valeurs de demi-vie déterminées à partir de plusieurs sections des courbes de charge et de décharge vient confirmer l'évolution exponentielle prévue de la tension, voir (1) et (2). La représentation des temps de demi-vie calculés en fonction de la résistance et de la capacité montre que les valeurs mesurées peuvent être ajustées au moyen d'une droite, voir (3).

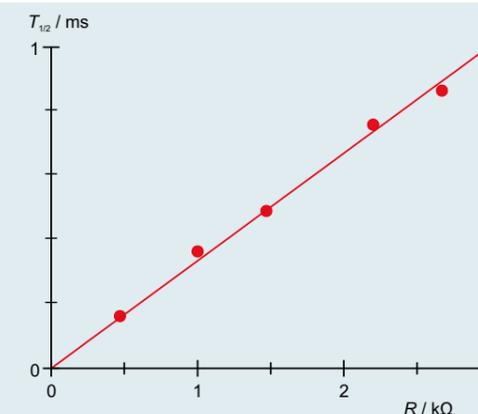


Fig. 2 Temps de demi-vie  $T_{1/2}$  en fonction de la résistance  $R$

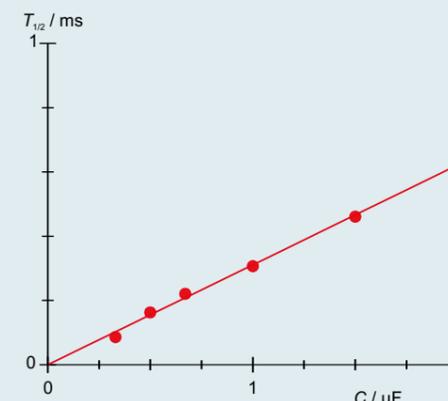


Fig. 3 Temps de demi-vie  $T_{1/2}$  en fonction de la capacité  $C$

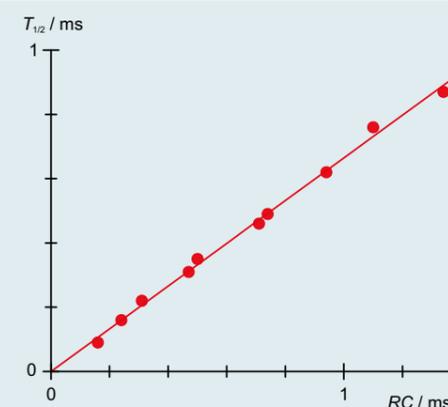


Fig. 4 Temps de demi-vie  $T_{1/2}$  en fonction du produit  $R \cdot C$



## EXERCICES

- Enregistrement point par point de l'évolution de la tension aux bornes du condensateur pendant la charge d'un condensateur par la mesure des temps de charge.
- Enregistrement point par point de l'évolution de la tension aux bornes du condensateur pendant la décharge d'un condensateur par la mesure des temps de décharge.
- Détermination des résistances et capacités internes par la mesure des temps de charge et de décharge et comparaison avec des paramètres externes connus.

## OBJECTIF

Mesure des temps de charge et de décharge

## RESUME

La courbe de décharge d'un condensateur est balayée point par point en mesurant les temps de charge jusqu'à ce que les valeurs de tension témoins soient atteintes. La mesure de la courbe de charge s'effectue selon le même procédé. À partir des valeurs mesurées, on détermine les données des résistances et condensateurs impliqués.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre                      | Appareil  | Référence  |
|-----------------------------|---|------------|
| 1                           | Appareil de charge et de décharge (230 V, 50/60 Hz) | 1017781 ou |
|                             | Appareil de charge et de décharge (115 V, 50/60 Hz) | 1017780    |
| 1                           | Condensateur 1000 µF, 16 V, P2W19                   | 1017806    |
| 1                           | Résistance 10 kΩ, 0,5 W, P2W19                      | 1012922    |
| <b>En plus recommandé :</b> |   |            |
| 1                           | Multimètre numérique P1035                          | 1002781    |

1

## GENERALITES

En régime continu, le courant ne traverse le condensateur que lorsque le circuit est activé ou désactivé. Le condensateur est chargé par le courant à l'activation du circuit jusqu'à ce que la tension appliquée soit atteinte, et déchargé à la désactivation du circuit jusqu'à ce que la tension soit nulle.

Pour un circuit en courant continu de capacité  $C$ , de résistance  $R$  et de tension continue  $U_0$ , on a à l'activation du circuit :

$$(1) \quad U(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

et à la désactivation du circuit :

$$(2) \quad U(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

avec la constante de temps

$$(3) \quad \tau = R \cdot C$$

Afin de vérifier ce phénomène, on procède pendant l'expérience à la mesure du temps écoulé jusqu'à l'obtention des valeurs de tension témoins réglées au préalable. Pour ce faire, le chronomètre est mis en marche en même temps que le processus de charge ou de décharge puis arrêté par commutation du comparateur dès que la tension témoin est atteinte. Les mesures effectuées pour différentes valeurs de tension témoins permettent de balayer les courbes de charge ou de décharge point par point. Dans la pratique, on s'intéressera également au temps

$$(4) \quad t_{5\%} = -\ln(5\%) \cdot R \cdot C \approx 3 \cdot R \cdot C$$

durant lequel la tension aux bornes du condensateur atteint 5% de la valeur de sortie  $U_0$  lors de la décharge et se rapproche de jusqu'à 5% de la valeur finale  $U_0$  pendant le charge. En mesurant le temps  $t_{5\%}$ , on peut par exemple déterminer les paramètres  $R$  et  $C$ .

## EVALUATION

Lorsque la résistance externe  $R_{ext}$  est connue, on calcule la capacité externe  $C_{ext}$  à partir du temps  $t_{5\%}$  comme indiqué au point (4) :

$$C_{ext} = \frac{t_{5\%}}{3 \cdot R_{ext}}$$

La capacité externe ainsi déterminée est commutée en parallèle à la capacité interne inconnue  $C_{int}$  afin de déterminer celle-ci en comparant les temps de charge et de décharge.

Finalement, on obtient les trois résistances internes encore inconnues  $R_{int, i}$  à partir des temps de charge et de décharge respectifs :

$$R_{int, i} = \frac{t_{5\%, i}}{3 \cdot C_{int}} \text{ avec } i = 1, 2, 3$$

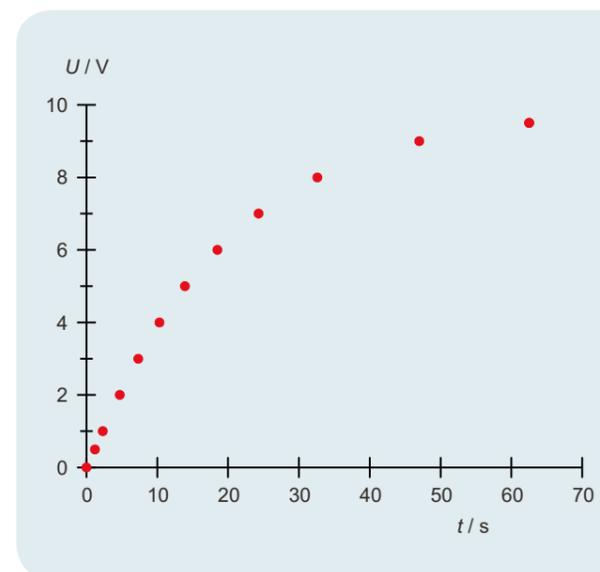


Fig. 1 Courbe de charge d'une paire R/C interne

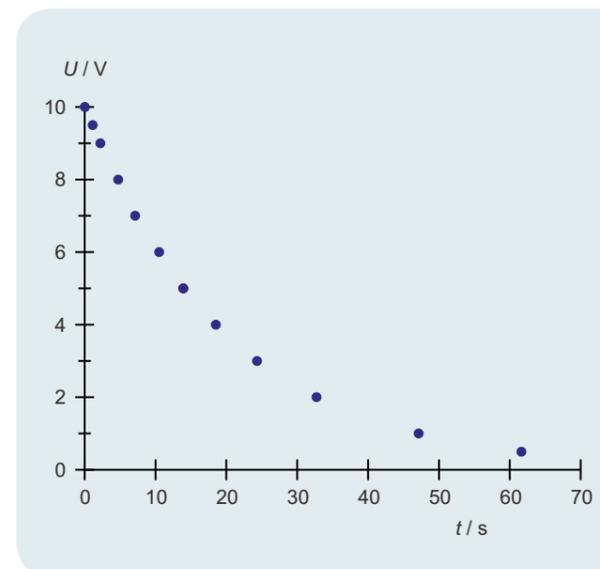
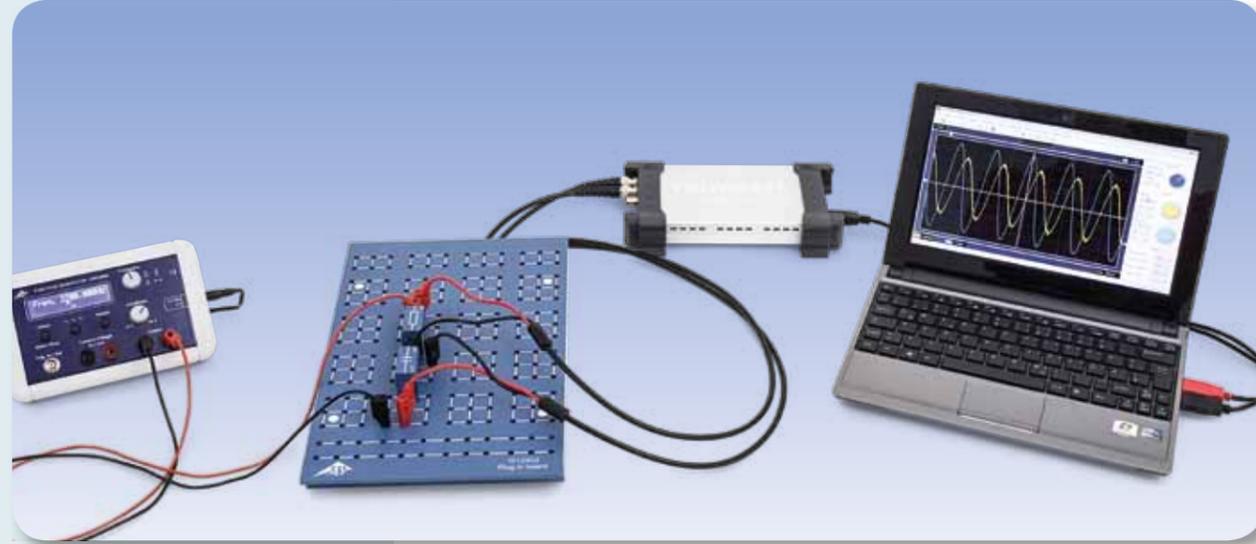


Fig. 2 Courbe de décharge d'une paire R/C interne

UE3050111

**RESISTANCE D'UN CONDENSATEUR DANS UN  
CIRCUIT A COURANT ALTERNATIF**



**EXERCICES**

- Déterminer l'amplitude et la différence de phase de la réactance capacitive en fonction de la capacité.
- Déterminer l'amplitude et la différence de phase de la réactance capacitive en fonction de la fréquence.

**OBJECTIF**

Déterminer la réactance capacitive en fonction de la capacité et de la fréquence

**RESUME**

Toute variation de la tension appliquée à un condensateur crée un courant à travers celui-ci. Si on applique une tension alternative, un courant alternatif traverse le condensateur avec un déphasage par rapport à la tension. Dans l'expérience, un générateur de fonctions fournit une tension alternative avec des fréquences allant jusqu'à 3 kHz. Un oscilloscope bi-canal enregistre le courant et la tension, ce qui permet de relever l'amplitude et la différence de phase de ces deux grandeurs. Le courant traversant le condensateur correspond à la chute de tension à travers une résistance de mesure dont la valeur est négligeable par rapport à la réactance capacitive.

**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Plaque de connexion des composants                | 1012902    |
| 1      | Résistance 1 Ω, 2 W, P2W19                        | 1012903    |
| 1      | Résistance 10 Ω, 2 W, P2W19                       | 1012904    |
| 3      | Condensateur 1 μF, 100 V, P2W19                   | 1012955    |
| 1      | Condensateur 0,1 μF, 100 V, P2W19                 | 1012953    |
| 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      | Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 1 mm² | 1002840    |



**GENERALITES**

Toute variation de la tension appliquée au condensateur crée un courant à travers celui-ci. Si on applique une tension alternative, un courant alternatif traverse le condensateur avec un déphasage par rapport à la tension. Ce phénomène s'explique aisément à l'aide d'une formule mathématique où l'on utilise le courant, la tension et la résistance comme des grandeurs complexes et que l'on considère leurs parties réelles.

De l'équation du condensateur, on déduit que

$$(1) \quad I = C \cdot \frac{dU}{dt}$$

$I$  : Courant,  $U$  : Tension,  $C$  : Capacité

Appliquer une tension

$$(2) \quad U = U_0 \cdot \exp(i \cdot 2\pi \cdot f \cdot t)$$

crée donc un courant électrique

$$(3) \quad I = i \cdot \omega \cdot C \cdot U_0 \cdot \exp(i \cdot 2\pi \cdot f \cdot t)$$

et l'on peut attribuer la résistance complexe

$$(4) \quad X_c = \frac{U}{I} = \frac{1}{i \cdot 2\pi \cdot f \cdot C}$$

à la capacité  $C$ . La partie réelle de chacune de ces grandeurs peut être mesurée, on a donc :

$$(5a) \quad U = U_0 \cdot \cos \omega t$$

$$(6a) \quad I = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot U_0 \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$= I_0 \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$(7a) \quad X_c = \frac{U_0}{I_0} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

Dans l'expérience, un générateur de fonctions fournit une tension alternative avec des fréquences allant jusqu'à 3 kHz. Un oscilloscope bi-canal enregistre le courant et la tension, ce qui permet de relever l'amplitude et la différence de phase de ces deux grandeurs. Le courant traversant le condensateur correspond à la chute de tension à travers une résistance de mesure dont la valeur est négligeable par rapport à la réactance capacitive.

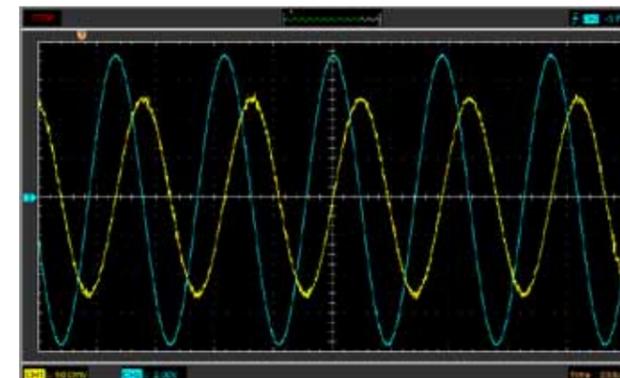


Fig. 1 Condensateur dans un circuit à courant alternatif : évolution du courant et de la tension

**EVALUATION**

Selon l'équation (4), la réactance capacitive  $X_c$  est proportionnelle à la valeur inverse de la fréquence  $f$  et à l'inverse de la capacité  $C$ . Comme le montrent les diagrammes, les valeurs relevées sont mesurables avec précision et situées sur une droite d'origine.

Le courant traversant le condensateur a une avance de phase de  $90^\circ$  par rapport à la tension du condensateur, car le courant de charge (signe +) et le courant de décharge (signe -) sont d'autant plus forts que la tension diminue (au maximum lorsque la tension est nulle).

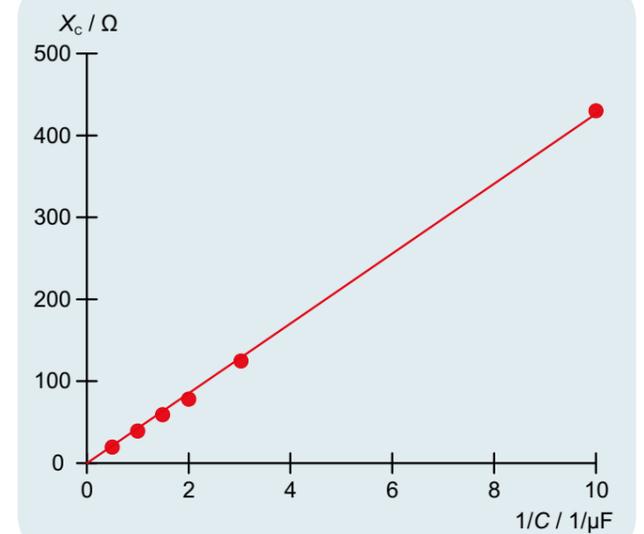


Fig. 2 Réactance capacitive  $X_c$  en fonction de la valeur inverse de la capacité  $C$

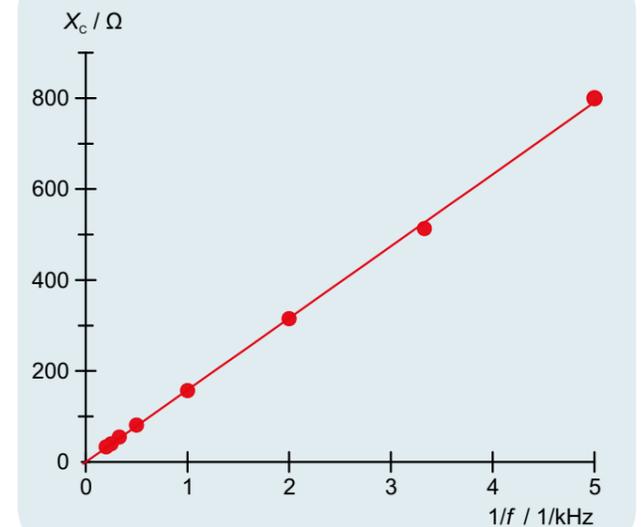
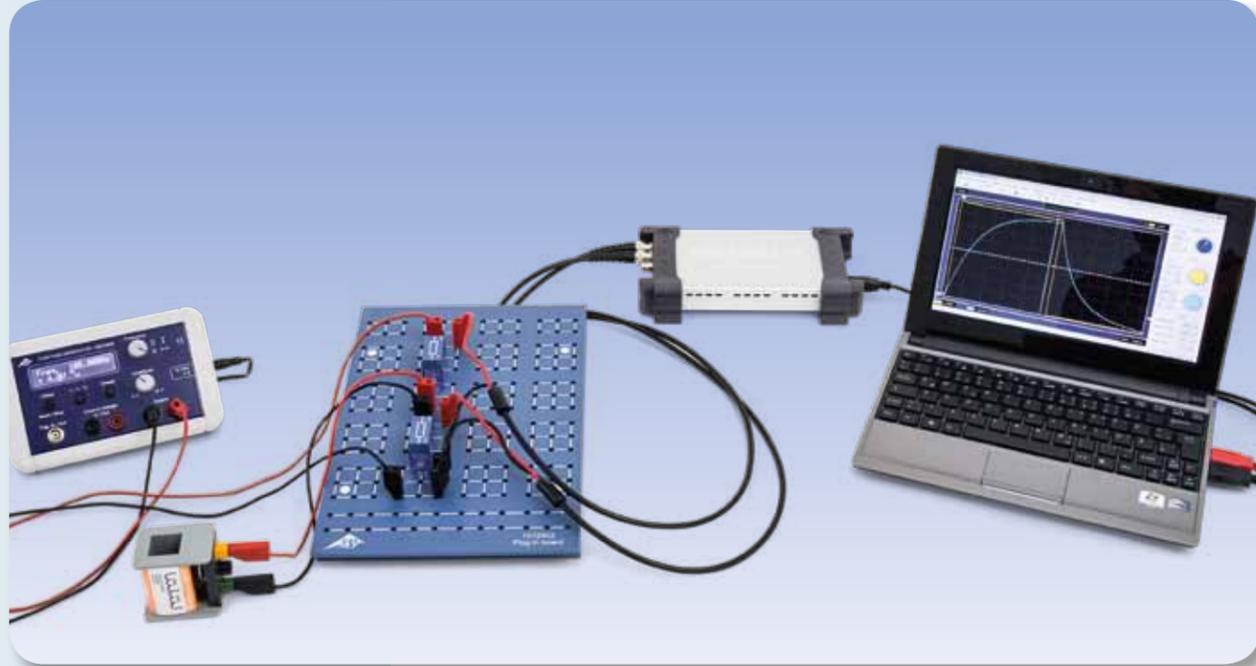


Fig. 3 Réactance capacitive  $X_c$  en fonction de la valeur inverse de la fréquence  $f$



EXERCICES

- Mesure du courant aux bornes de la bobine alimentée par une tension continue à l'allumage et à l'extinction du circuit.
- Déterminer le temps de demi-vie à l'allumage et à l'extinction du circuit à tension continue.
- Démontrer dans quelle mesure la demi-vie est fonction de l'inductance et de la résistance.

OBJECTIF

Étude de l'évolution du courant d'une bobine alimentée par une tension continue à l'allumage et à l'extinction du circuit.

RESUME

Le comportement d'une bobine dans un circuit à courant continu est modifié dès qu'il y a commutation ou interruption de la tension d'alimentation. La variation de courant est retardée par le phénomène d'auto-induction qui se crée aux bornes de la bobine, cette tension induite atteignant une valeur maximale à l'allumage du circuit et nulle à son extinction. La forme du courant de la bobine peut être représentée comme fonction exponentielle, c.-à-d. qu'au cours de la demi-vie  $T_{1/2}$ , le courant de la bobine diminue de la moitié. Il s'écoule le même laps de temps lorsque la tension chute de la moitié à un quart et d'un quart à un huitième. Le temps de demi-vie est proportionnel à l'inductance et à la résistance.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Plaque de connexion des composants                            | 1012902    |
| 1      | Résistance 1 Ω, 2 W, P2W19                                    | 1012903    |
| 1      | Résistance 10 Ω, 2 W, P2W19                                   | 1012904    |
| 1      | Résistance 22 Ω, 2 W, P2W19                                   | 1012907    |
| 1      | Résistance 47 Ω, 2 W, P2W19                                   | 1012908    |
| 1      | Résistance 150 Ω, 2 W, P2W19                                  | 1012911 ou |
| 1      | Jeu de 10 connecteurs de shuntage, P2W19                      | 1012985    |
| 2      | Bobine S à 1200 spires  | 1001002    |
| 1      | Générateur de fonctions FG 100 (230 V, 50/60 Hz)              | 1009957 ou |
| 1      | 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      | Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 1 mm <sup>2</sup> | 1002840    |



GENERALITES

Le comportement d'une bobine dans un circuit à courant continu est modifié dès que la tension continue est commutée ou interrompue. La variation de courant est retardée par le phénomène d'auto-induction qui se crée aux bornes de la bobine, cette tension induite atteignant une valeur maximale à l'allumage du circuit et nulle à son extinction. La forme du courant induit dans la bobine peut être représentée comme fonction exponentielle.

Pour un circuit en courant continu d'inductance  $L$ , de résistance  $R$  et de tension continue  $U_0$ , on a à l'allumage du circuit :

$$(1) \quad I(t) = I_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t \ln 2}{T_{1/2}}})$$

et à l'extinction du circuit :

$$(2) \quad I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{t \ln 2}{T_{1/2}}}$$

avec

$$(3) \quad T_{1/2} = \ln 2 \cdot \frac{L}{R}$$

$T_{1/2}$  est le temps de demi-vie, c.-à-d. que pendant ce laps de temps  $T_{1/2}$ , le courant de la bobine diminue de la moitié. Il s'écoule ce même laps de temps lors d'une chute de la moitié à un quart et d'un quart à un huitième.

Ce phénomène est étudié à l'aide du montage expérimental. L'expérience consiste à enregistrer l'allure temporelle du courant de la bobine au moyen d'un oscilloscope à mémoire. Le courant est mesuré en tant que baisse de la tension à travers une résistance  $R_M$  montée en série. Le courant  $I_0$  est choisi de manière à permettre une lecture aisée de la moitié, d'un quart et d'un huitième de cette grandeur.

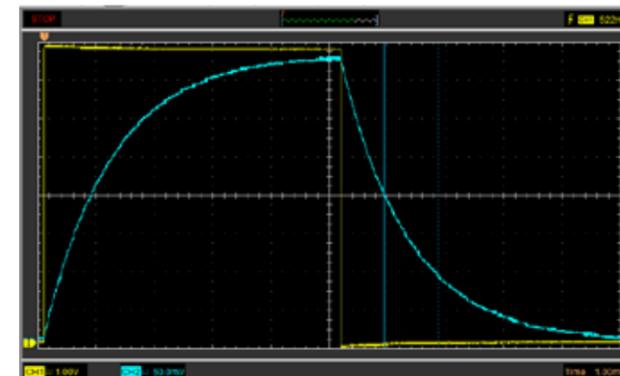


Fig. 1 Tension de la bobine au moment de la charge et de la décharge (enregistrement sur l'oscilloscope)

EVALUATION

La concordance des valeurs de demi-vie déterminées à partir de plusieurs sections des courbes de charge et de décharge vient confirmer l'évolution exponentielle prévue de la tension, voir (1) et (2). La représentation des temps de demi-vie calculés en fonction de la résistance et de l'inductance montre que les valeurs mesurées peuvent être ajustées au moyen d'une droite, voir (3).

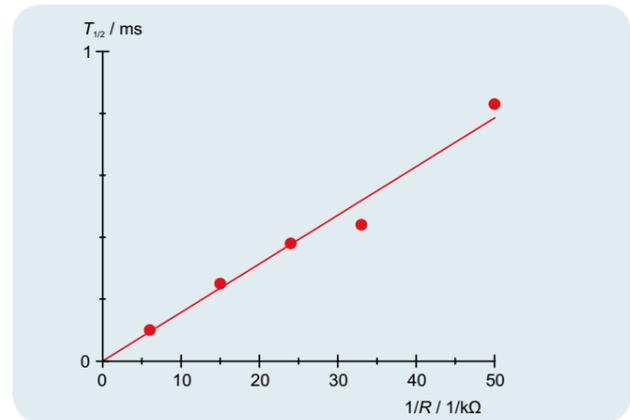


Fig. 2 Temps de demi-vie  $T_{1/2}$  comme fonction de la valeur inverse de la résistance  $R$

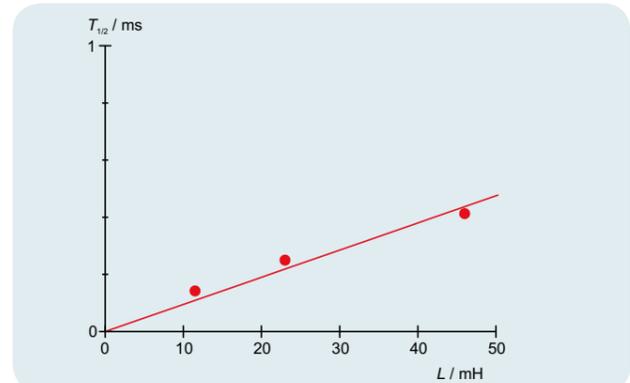


Fig. 3 Temps de demi-vie  $T_{1/2}$  en fonction de l'inductance  $L$

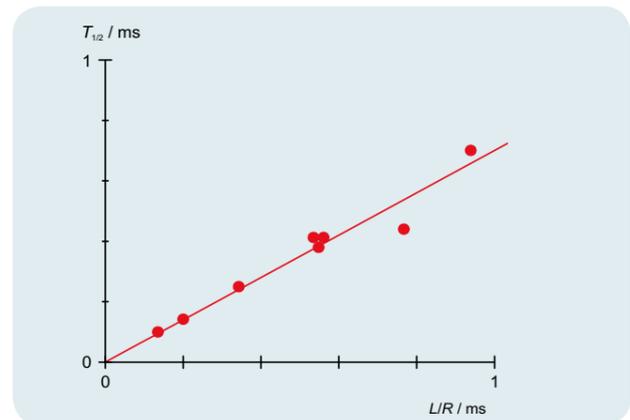
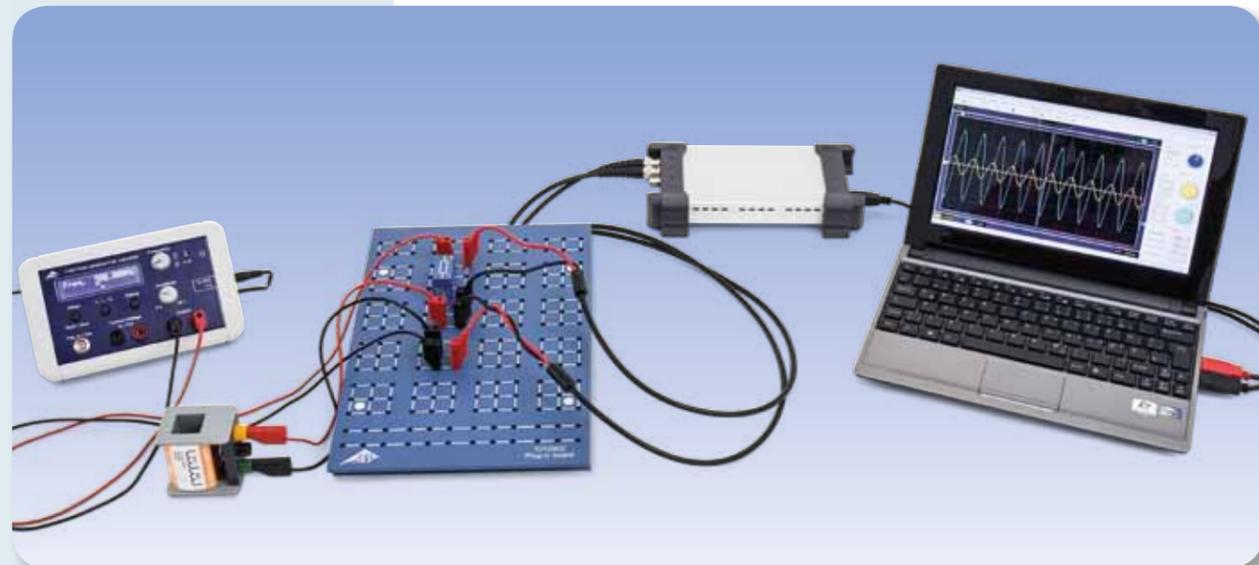


Fig. 4 Temps de demi-vie  $T_{1/2}$  en fonction de  $\frac{L}{R}$



**EXERCICES**

- Déterminer l'amplitude et la différence de phase de la réactance inductive en fonction de l'inductance.
- Déterminer l'amplitude et la différence de phase de la réactance inductive en fonction de la fréquence.

**OBJECTIF**

Déterminer la réactance inductive d'une bobine en fonction de l'inductance et de la fréquence

**RESUME**

Toute variation du courant électrique alimentant une bobine induit une tension. Si la bobine est traversée par un courant alternatif, une tension alternative est induite à ses bornes avec un déphasage par rapport au courant. Ce phénomène s'explique aisément à l'aide d'une formule mathématique où le courant, la tension et la résistance sont utilisés comme des grandeurs complexes et que leurs parties réelles sont considérées. Dans l'expérience, un générateur de fonctions fournit une tension alternative avec des fréquences de max. 2 kHz. Un oscilloscope bi-canal enregistre le courant et la tension, ce qui permet de relever l'amplitude et la phase de ces deux grandeurs. Le courant traversant la bobine correspond à la chute de tension à travers une résistance de mesure dont la valeur est négligeable par rapport à la réactance inductive.

**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Plaque de connexion des composants                            | 1012902    |
| 2      | Bobine S à 1200 spires  | 1001002    |
| 1      | Résistance 10 Ω, 2 W, P2W19                                   | 1012904    |
| 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      | Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 1 mm <sup>2</sup> | 1002840    |



**GENERALITES**

Toute variation du courant électrique alimentant une bobine crée une tension aux bornes de celle-ci, une tension induite qui va s'opposer au courant d'alimentation et donc aux variations de courant. Dans un circuit alternatif, la tension aux bornes de la bobine est en avance de phase par rapport au courant alimentant la bobine. Ce phénomène s'explique aisément à l'aide d'une formule mathématique où l'on utilise le courant, la tension et la résistance comme des grandeurs complexes et que l'on considère leurs parties réelles.

Le rapport courant-tension d'une bobine s'écrit :

$$(1) \quad U = L \cdot \frac{di}{dt}$$

$i$  : Courant,  $U$  : Tension,  $L$  : Inductance

$$(2) \quad \text{Pour une tension} \quad U = U_0 \cdot \exp(i \cdot 2\pi \cdot f \cdot t)$$

le courant est donné par

$$(3) \quad i = \frac{U_0}{i \cdot 2\pi \cdot f \cdot L} \cdot \exp(i \cdot 2\pi \cdot f \cdot t)$$

Par conséquent, on peut attribuer la résistance complexe (ou réactance inductive)

$$(4) \quad X_L = \frac{U}{I} = i \cdot 2\pi \cdot f \cdot L$$

à l'inductance  $L$ . La partie réelle de chacune de ces grandeurs peut être mesurée, on a donc :

$$(5a) \quad U = U_0 \cdot \cos \omega t$$

$$(6a) \quad i = \frac{U_0}{2\pi \cdot f \cdot L} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$= I_0 \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$(7a) \quad X_L = \frac{U_0}{I_0} = 2\pi \cdot f \cdot L$$

Dans l'expérience, un générateur de fonctions fournit une tension alternative avec des fréquences allant jusqu'à 2 kHz. Un oscilloscope bi-canal enregistre le courant et la tension, ce qui permet de relever l'amplitude et la différence de phase de ces deux grandeurs. Le courant traversant la bobine est fonction de la chute de tension aux bornes d'une résistance de mesure dont la valeur est négligeable par rapport à la réactance inductive.

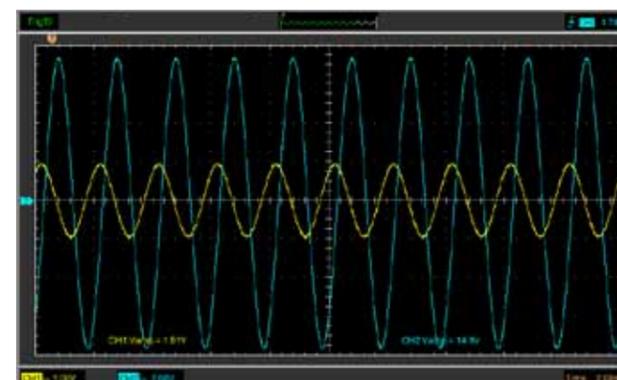


Fig. 1 Bobine dans un circuit alternatif : évolution du courant et de la tension

**EVALUATION**

Selon l'équation (4), la réactance inductive  $X_L$  est proportionnelle à la fréquence  $f$  et à l'inductance  $L$ . Comme le montrent les diagrammes correspondants, les valeurs mesurées se situent dans les limites de précision de mesure sur une droite d'origine.

Le courant alimentant la bobine est en retard de phase de 90° sur la tension appliquée à la bobine, car toute variation du courant crée une tension induite opposée.

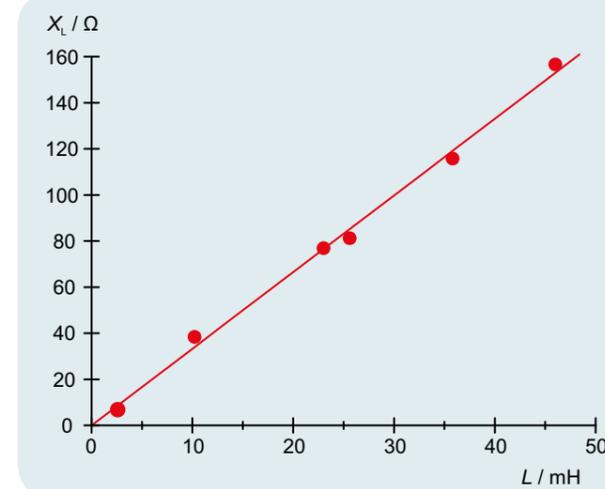


Fig. 2 Réactance inductive  $X_L$  en fonction de l'inductance  $L$

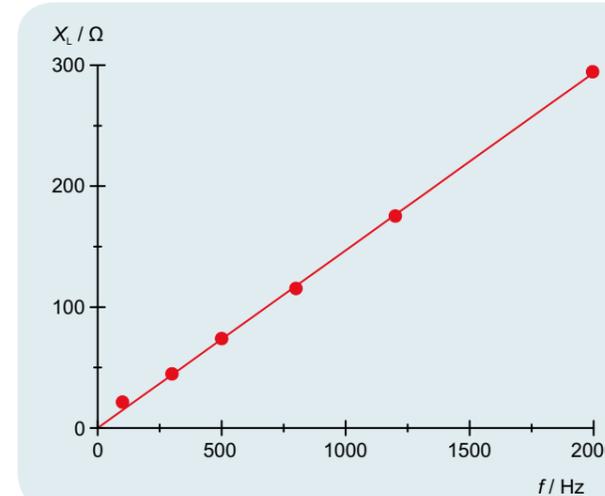


Fig. 3 Réactance inductive  $X_L$  en fonction de la fréquence  $f$



**EXERCICES**

- Déterminer l'amplitude et la différence de phase de la résistance totale en fonction de la fréquence dans un montage en série.
- Déterminer l'amplitude et la différence de phase de la résistance totale en fonction de la fréquence dans un montage en parallèle.

**OBJECTIF**

Déterminer la valeur de la résistance (impédance) dans un circuit comportant des charges capacitatives et résistives

**RESUME**

Dans les circuits à courant alternatif, il faut considérer non seulement les résistances ohmiques, mais également les résistances induites par les charges capacitatives. Ces deux types de résistances peuvent être combinées et montées dans un circuit en série ou en parallèle. C'est de cela que dépendront à la fois les amplitudes et le déphasage du courant par rapport à la tension. Dans l'expérience, ces deux grandeurs sont mesurées à l'aide d'un oscilloscope et d'un générateur de fonctions fournissant des tensions alternatives avec des fréquences comprises entre 50 et 2000 Hz.

**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Plaque de connexion des composants                            | 1012902    |
| 1      | Résistance 1 Ω, 2 W, P2W19                                    | 1012903    |
| 1      | Résistance 100 Ω, 2 W, P2W19                                  | 1012910    |
| 1      | Condensateur 10 μF, 35 V, P2W19                               | 1012957    |
| 1      | Condensateur 1 μF, 100 V, P2W19                               | 1012955    |
| 1      | Condensateur 0,1 μF, 100 V, P2W19                             | 1012953    |
| 1      | Générateur de fonctions FG 100 (230 V, 50/60 Hz)              | 1009957 ou |
| 1      | 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      | Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 1 mm <sup>2</sup> | 1002840    |

**GENERALITES**

Dans les circuits à courant alternatif, il est fréquent d'utiliser des nombres complexes (résistances non ohmiques ou impédance) pour décrire la résistance dans un circuit comportant des charges capacitatives, car cela facilite le calcul. En effet, il s'agit d'une part de mesurer respectivement l'amplitude du courant et de la tension, mais aussi de considérer les relations de phase entre ces deux grandeurs. De cette façon, les montages en série et en parallèle de résistances capacitatives et ohmiques se laissent très facilement expliquer. La tension et le courant sont également considérés comme des grandeurs complexes, dont les parties réelles peuvent respectivement être mesurées.



La réactance capacitive complexe d'un condensateur de capacité  $C$  dans un circuit à courant alternatif de fréquence  $f$  s'écrit :

$$(1) \quad X_c = \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C},$$

avec  $\omega = 2\pi \cdot f$

Par conséquent, la résistance totale du montage en série du condensateur avec une résistance ohmique  $R$  s'exprime comme suit :

$$(2) \quad Z_s = \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C} + R,$$

tandis que dans un montage en parallèle, la résistance totale est de :

$$(3) \quad Z_p = \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C + \frac{1}{R}}$$

Selon la formule couramment employée

$$(4) \quad Z = Z_0 \cdot \exp(i \cdot \varphi)$$

on en déduit

$$(5) \quad Z_s = \frac{\sqrt{1 + (\omega \cdot C \cdot R)^2}}{\omega \cdot C} \cdot \exp(i \cdot \varphi_s)$$

avec  $\tan \varphi_s = -\frac{1}{\omega \cdot C \cdot R}$

et

$$(6) \quad Z_p = \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega \cdot C \cdot R)^2}} \cdot \exp(i \cdot \varphi_p)$$

avec  $\tan \varphi_p = -\omega \cdot C \cdot R.$

Dans l'expérience, un générateur de fonctions fournit des tensions alternatives avec des fréquences réglables entre 50 et 2000 Hz. La tension  $U$  et le courant d'intensité  $I$  sont représentés sur un oscilloscope, où  $I$  correspond à la chute de la tension à travers une petite résistance dynamique. Pour les parties réelles de la tension aux bornes de la résistance  $Z$  respective, on a donc :

$$(7) \quad U = U_0 \cdot \exp(i \cdot \omega \cdot t)$$

et pour le courant créé :  $I = \frac{U_0}{Z_0} \cdot \exp(i \cdot (\omega \cdot t - \varphi))$

$$(8) \quad = I_0 \cdot \exp(i \cdot (\omega \cdot t - \varphi))$$

Sur l'oscilloscope, on relève les valeurs d'amplitude  $I_0$  et  $U_0$  ainsi que le déphasage  $\varphi$ .

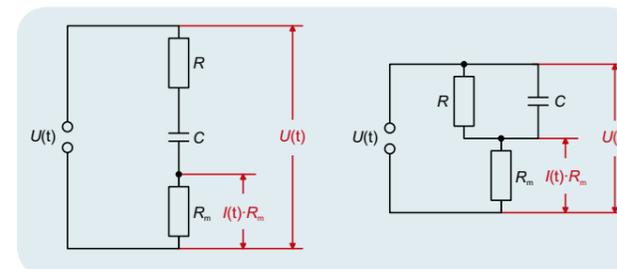


Fig. 1 Dispositif de mesure pour un circuit en série

Fig. 2 Dispositif de mesure dans un circuit en parallèle

**EVALUATION**

La valeur de la résistance totale (impédance)  $Z_0 = \frac{U_0}{I_0}$  est représentée en fonction de la fréquence  $f$  ou de la charge capacitive  $X_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$ . Dans les circuits à petites fréquences, la résistance du montage en série correspond à la valeur de la charge (impédance) capacitive et celle du montage en parallèle à la valeur de la résistance ohmique. Le déphasage se situe entre  $0^\circ$  et  $-90^\circ$  et il est de  $-45^\circ$  lorsque les valeurs de résistance ohmique et inductive sont identiques.

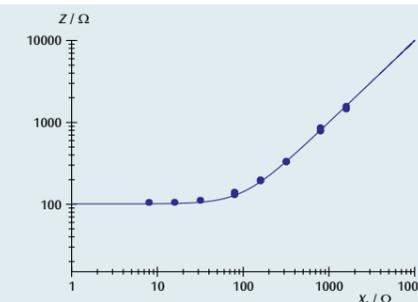


Fig. 3 Résistance totale (impédance) dans un circuit en série

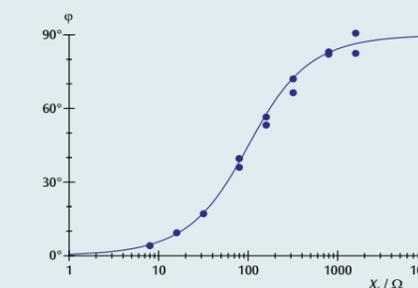


Fig. 4 Déphasage dans un circuit en série

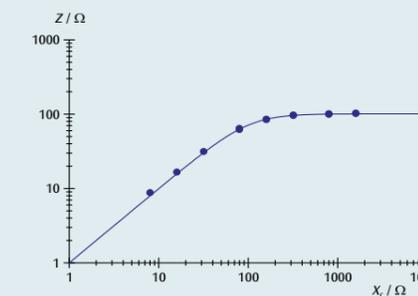


Fig. 5 Résistance totale (impédance) dans un circuit en parallèle

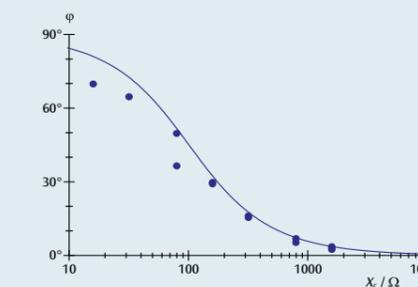
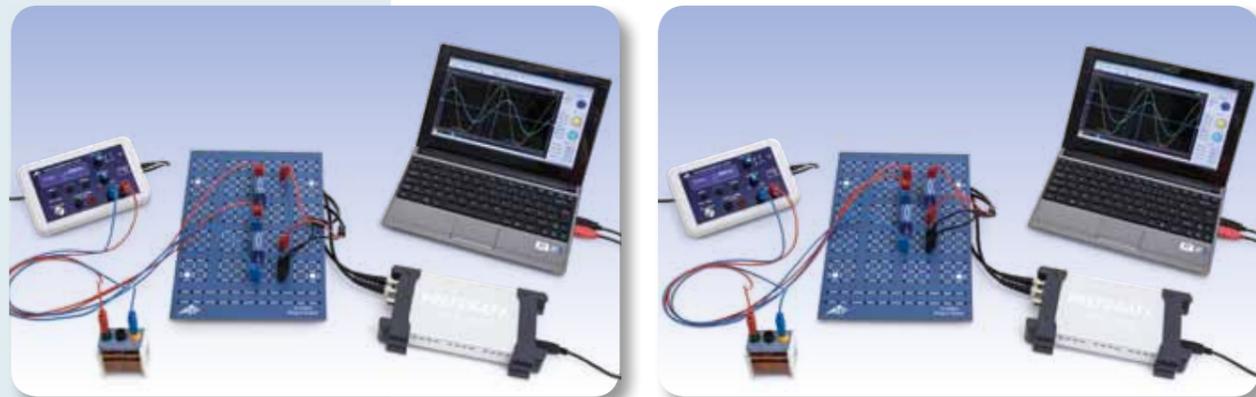


Fig. 6 Déphasage dans un circuit en parallèle



**EXERCICES**

- Déterminer l'amplitude et la différence de phase de la résistance totale (impédance) en fonction de la fréquence dans un montage en série.
- Déterminer l'amplitude et la différence de phase de la résistance totale (impédance) en fonction de la fréquence dans un montage en parallèle.

**OBJECTIF**

Déterminer la valeur de la résistance en courant alternatif dans un circuit comportant des charges inductives et résistives

**RESUME**

Dans les circuits à courant alternatif, il faut considérer non seulement les résistances ohmiques, mais également les résistances inductives. Ces deux types de résistances peuvent être combinées et montées dans un circuit en série ou en parallèle. C'est de cela que dépendront à la fois les amplitudes et les différences de phase du courant par rapport à la tension. Dans l'expérience, ces grandeurs sont étudiées à l'aide d'un oscilloscope et d'un générateur de fonctions fournissant des tensions alternatives avec des fréquences comprises entre 50 et 10000 Hz.

**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Plaque de connexion des composants                            | 1012902    |
| 1      | Résistance 1 Ω, 2 W, P2W19                                    | 1012903    |
| 1      | Résistance 100 Ω, 2 W, P2W19                                  | 1012910    |
| 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      | Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 1 mm <sup>2</sup> | 1002840    |
| 1      | Bobine S à 600 spires   | 1001000    |
| 1      | Bobine S à 1200 spires  | 1001002    |

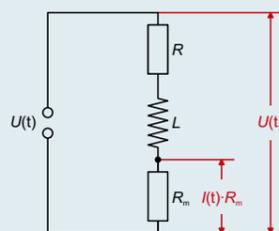


Fig. 1 Dispositif de mesure pour un circuit en série

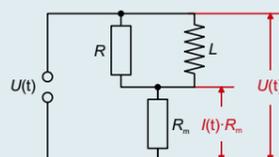


Fig. 2 Dispositif de mesure dans un circuit en parallèle

**GENERALITES**

Dans les circuits à courant alternatif, il est fréquent d'utiliser des nombres complexes (résistances non ohmiques ou impédance) pour décrire la résistance dans un circuit comportant des charges inductives, car cela facilite le calcul. En effet, il s'agit d'une part de mesurer respectivement l'amplitude du courant et de la tension, mais aussi de considérer les relations de phase entre ces deux grandeurs. De cette façon, les montages en série et en parallèle de résistances inductives et ohmiques se laissent très facilement expliquer. La tension et le courant sont également considérés comme des grandeurs complexes, dont les parties réelles peuvent respectivement être mesurées.

La résistance complexe (impédance) d'une bobine d'inductance  $L$  dans un circuit à courant alternatif de fréquence  $f$  s'écrit :

$$(1) \quad X_L = i \cdot 2\pi \cdot f \cdot L$$

avec  $\omega = 2\pi \cdot f$

Par conséquent, la résistance totale (impédance) du montage en série de la bobine avec une résistance ohmique  $R$  s'exprime :

$$(2) \quad Z_s = i \cdot 2\pi \cdot f \cdot L + R,$$

tandis que dans un montage en parallèle, la résistance totale s'écrit :

$$(3) \quad Z_p = \frac{1}{\frac{1}{i \cdot 2\pi \cdot f \cdot L} + \frac{1}{R}}$$

Selon la formule couramment employée

$$(4) \quad Z = Z_0 \cdot \exp(i \cdot \varphi),$$

on en déduit

$$(5) \quad Z_s = \sqrt{(2\pi \cdot f \cdot L)^2 + R^2} \cdot \exp(i \cdot \varphi_s)$$

avec

$$\tan \varphi_s = \frac{2\pi \cdot f \cdot L}{R}$$

et

$$(6) \quad Z_p = \frac{2\pi \cdot f \cdot L \cdot R}{\sqrt{(2\pi \cdot f \cdot L)^2 + R^2}} \cdot \exp(i \cdot \varphi_p)$$

avec

$$\tan \varphi_p = \frac{R}{2\pi \cdot f \cdot L}$$

Dans l'expérience, un générateur de fonctions fournit des tensions alternatives avec des fréquences réglables entre 50 et 10000 Hz. La tension  $U$  et le courant d'intensité  $I$  sont représentés sur un oscilloscope, où  $I$  correspond à la chute de la tension à travers une petite résistance dynamique auxiliaire. Pour les parties réelles de la tension aux bornes de la résistance  $Z$  respective, on a donc :

$$(7) \quad U = U_0 \cdot \exp(i \cdot 2\pi \cdot f \cdot t)$$

et pour le courant créé :

$$(8) \quad I = \frac{U_0}{Z_0} \cdot \exp(i \cdot (2\pi \cdot f \cdot t - \varphi))$$

$$= I_0 \cdot \exp(i \cdot (2\pi \cdot f \cdot t - \varphi))$$

Sur l'oscilloscope, on relève respectivement les valeurs d'amplitude  $I_0$  et  $U_0$  ainsi que la différence de phase  $\varphi$ .

**EVALUATION**

La valeur de la résistance totale (impédance)  $Z_0 = \frac{U_0}{I_0}$  est représentée en fonction de la fréquence  $f$  ou de la charge (impédance) inductive  $X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$ . Dans un circuit de grande impédance inductive, la résistance du montage en série correspond à la valeur de la charge (impédance) inductive et celle du montage en parallèle, à la valeur de la résistance ohmique. Le déphasage se situe entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$  et il est de  $45^\circ$  lorsque les valeurs de résistance ohmique et inductive sont identiques.

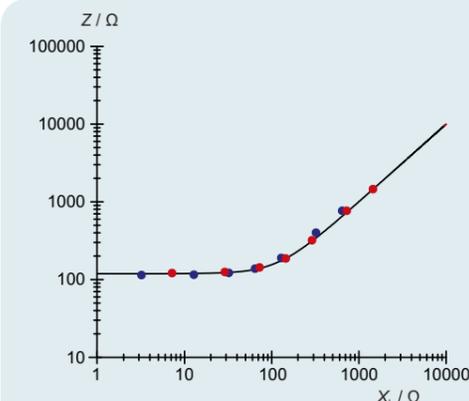


Fig. 3 Résistance totale (impédance) dans un circuit en série

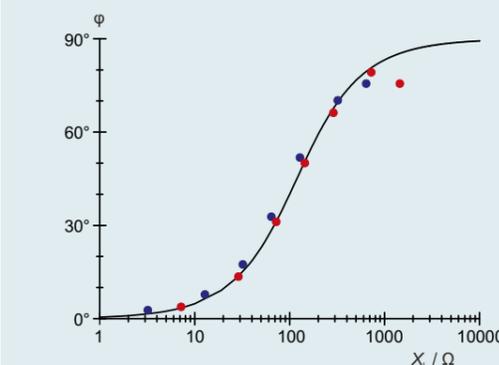


Fig. 4 Déphasage dans un circuit en série

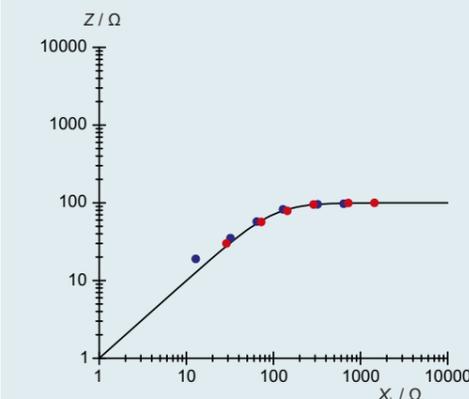


Fig. 5 Résistance totale (impédance) dans un circuit en parallèle

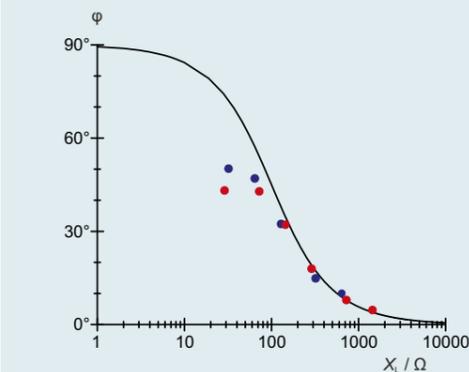
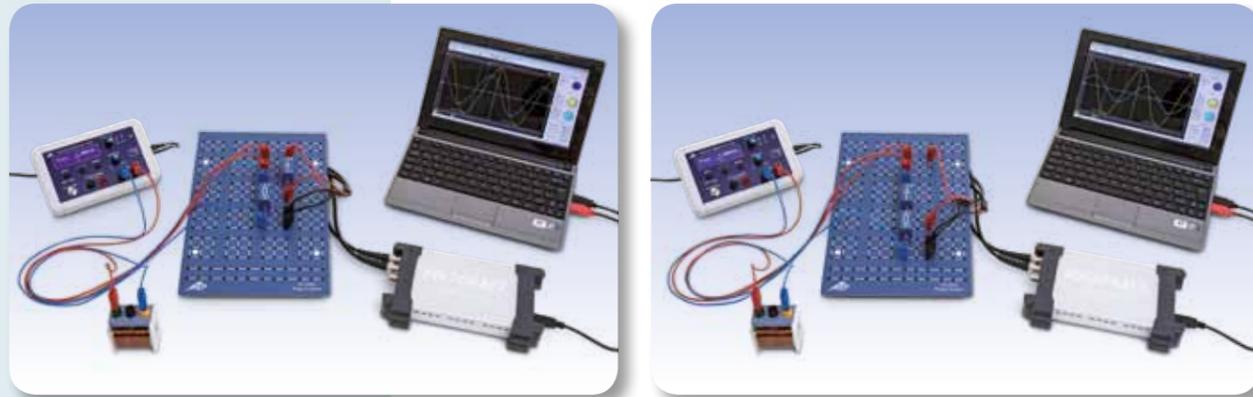


Fig. 6 Déphasage dans un circuit en parallèle



## EXERCICES

- Détermination de la résistance en courant alternatif sur des circuits série ou parallèles à résistance capacitive et inductive en fonction de la fréquence.
- Détermination de la fréquence de résonance en fonction de l'inductance et de la capacité.
- Observation de la modification du déphasage entre le courant et la tension avec une fréquence de résonance.

## OBJECTIF

Détermination de la résistance en courant alternatif dans un circuit électrique à résistance inductive et capacitive

## RESUME

Les circuits en courant alternatif à résistances inductives et capacitives présentent un comportement de résonance. Avec la fréquence de résonance, la résistance du circuit série à résistance inductive et capacitive devient nulle, la résistance du circuit parallèle en revanche devient infiniment grande. Au cours de l'expérience, nous allons l'étudier avec un oscilloscope, un générateur de fonctions fournissant des tensions alternatives entre 50 et 20 000 Hz.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Plaque de connexion des composants                            | 1012902    |
| 1      | Condensateur 1 $\mu$ F, 100 V, P2W19                          | 1012955    |
| 1      | Condensateur 4,7 $\mu$ F, 63 V, P2W19                         | 1012946    |
| 1      | Bobine S à 600 spires   | 1001000    |
| 1      | Bobine S à 1200 spires  | 1001002    |
| 1      | Résistance 10 $\Omega$ , 2 W, P2W19                           | 1012904    |
| 1      | Générateur de fonctions FG 100 (230 V, 50/60 Hz)              | 1009957 ou |
| 1      | 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      | Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 1 mm <sup>2</sup> | 1002840    |

## GENERALITES

Les résistances inductives dans les circuits à courant alternatif augmentent au fur et à mesure que la fréquence du courant alternatif augmente, tandis que les résistances capacitives diminuent. Aussi les circuits série ou parallèle à résistances capacitives et inductives présentent-ils un comportement de résonance. On parle de circuits oscillants, parce que le courant et la tension oscille entre la capacité et l'inductance. Une résistance ohmique supplémentaire atténue cette oscillation.

# 2

Pour calculer les circuits série ou parallèles, pour des raisons de facilité, on assigne à une inductance  $L$  la résistance complexe

$$(1) \quad X_L = i \cdot 2\pi \cdot f \cdot L$$

$f$ : fréquence du courant alternatif

et à une capacité  $C$  la résistance complexe

$$(2) \quad X_C = \frac{1}{i \cdot 2\pi \cdot f \cdot C}$$

Pour la résistance totale d'un circuit série sans résistance ohmique, on a

$$(3) \quad Z_S = i \cdot \left( 2\pi \cdot f \cdot L - \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \right),$$

tandis que le circuit parallèle se calcule de la manière suivante :

$$(4) \quad \frac{1}{Z_P} = -i \cdot \left( \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot L} - 2\pi \cdot f \cdot C \right)$$

Avec la fréquence de résonance,

$$(5) \quad f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

la résistance  $Z_S$  disparaît du circuit série de résistance inductive et capacitive ; c'est-à-dire que les tensions individuelles sont égales et de sens opposés. En revanche, la valeur de la résistance  $Z_P$  du circuit parallèle devient infiniment grande, c'est-à-dire que les courants individuels sont égaux et de sens opposés. De plus, avec la fréquence de résonance, le déphasage entre le courant et la tension change de signe.

Au cours de l'expérience, des circuits oscillants sont montés en circuits série ou parallèle de capacité et d'inductance. Un générateur de fonctions sert de source de tension avec une fréquence et une amplitude réglables. Un oscilloscope permet de mesurer le courant et la tension en fonction de la fréquence réglée. La tension  $U$  et le courant  $I$  sont représentés sur un oscilloscope,  $I$  étant la chute de tension sur une petite résistance de travail.

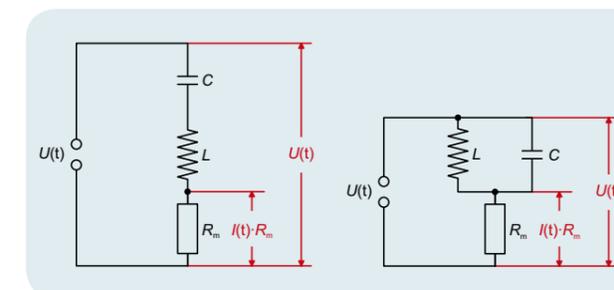


Fig. 1 Agencement de la mesure pour circuit série

Fig. 2 Agencement de la mesure pour circuit parallèle

## EVALUATION

Sur l'oscilloscope, on lit pour chaque fréquence  $f$  le déphasage  $\phi$  ainsi que les amplitudes  $I_0$  et  $U_0$ . On s'en sert pour calculer la valeur de la résistance totale  $Z_0 = \frac{U_0}{I_0}$ .

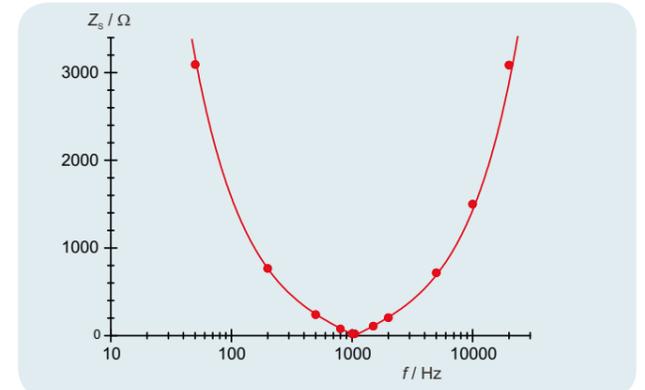


Fig. 3 Résistance de courant alternatif du circuit série en fonction de la fréquence

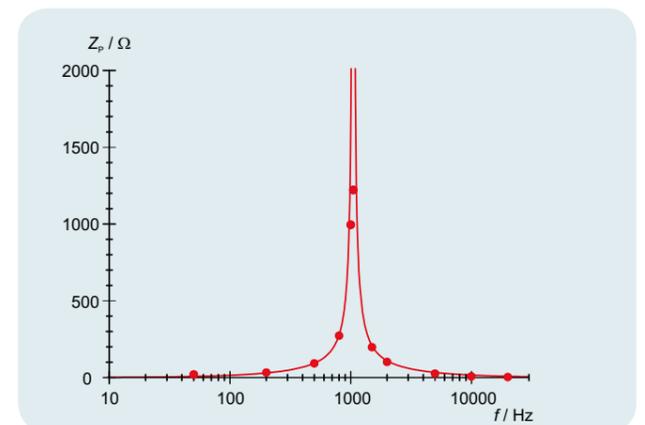


Fig. 4 Résistance de courant alternatif du circuit parallèle en fonction de la fréquence

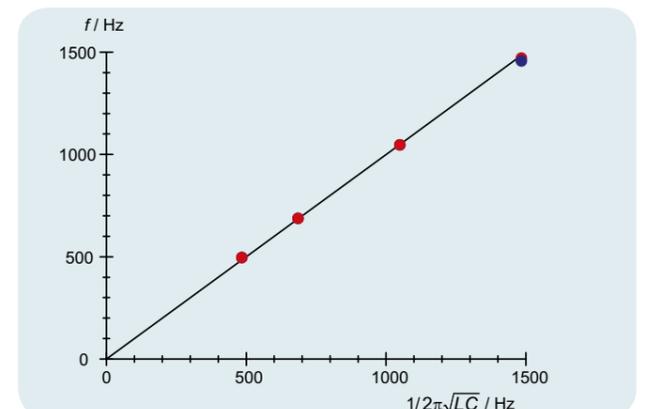


Fig. 5 Comparaison entre la fréquence de résonance mesurée et calculée pour un circuit série (rouge) et un circuit parallèle (bleu)



## EXERCICES

- Enregistrer les courbes de résonance d'amplitude d'un circuit oscillant série LC pour différentes atténuations.
- Déterminer la fréquence de résonance du circuit oscillant série LC.

## OBJECTIF

Étudier le comportement en résonance d'un circuit oscillant série LC

## RESUME

Un circuit oscillant électrique est un circuit présentant la faculté de résonance et constitué d'une inductance et d'une capacité. Dans l'expérience, le générateur de fonctions produit une tension alternative qui excite un circuit oscillant série. On mesure la courbe de résonance d'amplitude, donc le courant, en fonction de la fréquence à amplitude de tension constante. Si la capacité est connue, la fréquence de résonance permet de calculer l'inductance inconnue.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Unité d'expérimentation électrique (230 V, 50/60 Hz)          | 1000573 ou |
|        | Unité d'expérimentation électrique (115 V, 50/60 Hz)          | 1000572    |
| 1      | 3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)                                  | 1000540 ou |
|        | 3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)                                  | 1000539    |
| 1      | 3B NETlab™  | 1000544    |
| 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      | Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 1 mm <sup>2</sup> | 1002840    |

# 2

## GENERALITES

Un circuit oscillant électrique est un circuit présentant la faculté de résonance et constitué d'une bobine d'inductance  $L$  et d'un condensateur de capacité  $C$ . Par l'échange périodique d'énergie entre le champ magnétique de la bobine et le champ électrique du condensateur, le circuit oscillant produit des oscillations électriques. L'échange entraîne en alternance une intensité maximale sur la bobine ou une tension maximale sur le condensateur.

Si le circuit oscillant n'oscille pas librement, mais est excité de l'extérieur par un signal sinusoïdal, il oscille à la même fréquence que l'excitation et les amplitudes du courant et des tensions sur les différents composants dépendent de la fréquence. Le courant  $I$  résulte de la loi d'Ohm :

$$(1) \quad I = \frac{U}{Z} = \frac{U_0 \cdot e^{i\omega t}}{Z}$$

$U$  : tension d'entrée sinusoïdale

$U_0$  : amplitude,  $\omega$  : fréquence angulaire

$Z$  : impédance totale

Dans un circuit série, l'impédance totale est égale à la somme des impédances des différentes composantes. À cela s'ajoute une résistance ohmique  $R$  qui tient compte des pertes apparaissant dans un circuit oscillant réel, en les complétant éventuellement par une résistance externe. Par conséquent

$$(2) \quad Z = R + i\omega L + \frac{1}{i\omega C}$$

Pour le courant, il résulte de (1) et (2)

$$(3) \quad I(\omega) = \frac{U_0 \cdot e^{i\omega t}}{R + i\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$$

La valeur du courant correspond à son amplitude qui dépend de la fréquence :

$$(4) \quad I_0(\omega) = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Avec la fréquence de résonance, il est au maximum

$$(5) \quad f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

et atteint la valeur

$$(6) \quad I_0(\omega_r) = \frac{U_0}{R}$$

En cas de résonance, le circuit oscillant série se comporte donc comme s'il n'était composé que d'une résistance ohmique. En cas de résonance, une capacité et une inductance montées en série représentent notamment un court-circuit.

Dans l'expérience, le générateur de fonctions produit une tension alternative qui excite le circuit oscillant. Le courant  $I$  est mesuré en fonction de la fréquence  $f$  à amplitude de tension constante. Le courant est mesuré avec une interface de mesure et saisi puis représenté graphiquement avec un logiciel de mesure et d'évaluation. La courbe de résonance d'amplitude du courant, c'est-à-dire la dépendance de l'amplitude du courant vis-à-vis de la fréquence, est enregistrée automatiquement.

## EVALUATION

La courbe de résonance d'amplitude permet de lire la fréquence de résonance  $f_r$ . Connaissant la capacité  $C$ , on calcule l'inductance inconnue  $L$  avec l'équation (5) :

$$L = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_r^2 \cdot C}$$

L'amplitude de la courbe de résonance permet de calculer la résistance ohmique  $R$  à l'aide de l'équation (6). En l'absence de résistance externe,  $R$  correspond aux pertes ohmiques du circuit oscillant réel.

$$R = \frac{U_0}{I_0(\omega_r)}$$

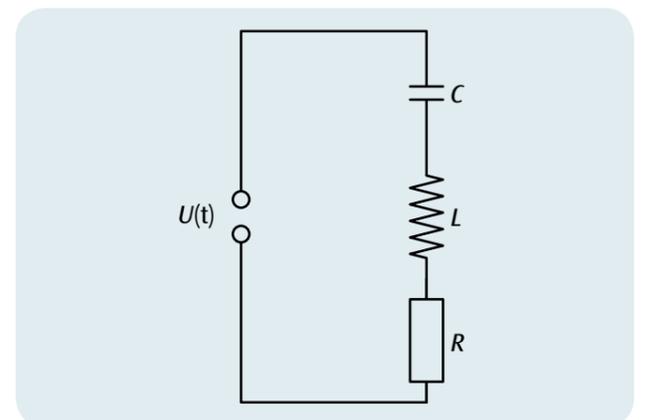


Fig. 1 Schéma du circuit oscillant série LC

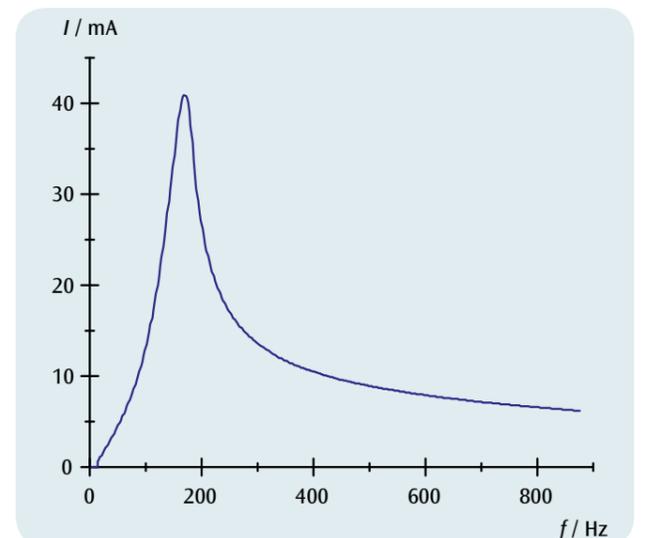
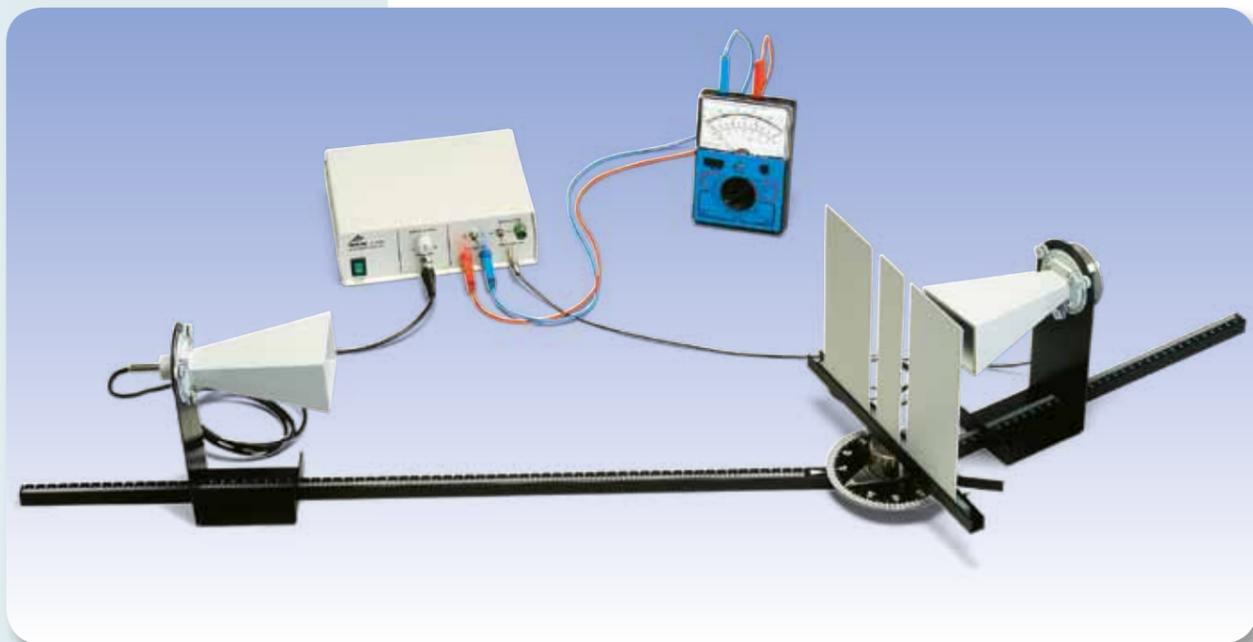


Fig. 2 Courbe de résonance d'amplitude du courant ( $R_{ext} = 0$ )

UE3060300 OPTIQUE ONDULATOIRE AVEC ONDES CENTIMETRIQUES

UE3060300



EXERCICES

- Mesure point par point de l'intensité en cas de diffraction de ondes centimétriques par une fente double.
- Détermination des maxima pour différents ordres de diffraction.
- Détermination de la longueur d'onde avec un écart de fente connu.
- Étude et modification de la polarisation des micro-ondes rayonnées.

OBJECTIF

Démonstration et étude de l'interférence, de la diffraction et de la polarisation sur les ondes centimétriques

RESUME

Les ondes centimétriques permettent d'illustrer de nombreuses expériences sur l'interférence, la diffraction et la polarisation. On utilise des objets de diffraction et des grilles de polarisation dont la structure interne est visible à l'oeil nu. Les expériences montrent qu'en cas de diffraction par une fente double, l'intensité maximale est mesurée précisément au moment où le récepteur ne capte pas l'onde émise par l'émetteur par le chemin direct.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                                       | Référence  |
|--------|--|------------|
| 1      | Kit micro-ondes 9,4 GHz (230 V, 50/60 Hz)      | 1009951 ou |
|        | Kit micro-ondes 10,5 GHz (115 V, 50/60 Hz)     | 1009950    |
| 1      | Multimètre analogique AM50                     | 1003073    |
| 1      | Paire de cordons de sécurité, 75cm, rouge/bleu | 1017718    |



GENERALITES

L'optique ondulatoire considère la lumière observée comme une onde électromagnétique transversale et explique ainsi l'interférence, la diffraction et la polarisation de la lumière. Les micro-ondes sont également des ondes électromagnétiques et présentent les mêmes phénomènes, mais leurs longueurs d'onde sont nettement supérieures à celles de la lumière visible. Aussi utilise-t-on pour les expériences en optique ondulatoire avec des micro-ondes des objets de diffraction et des grilles de polarisation dont la structure interne est visible à l'oeil nu.

Dans l'expérience, la diffraction de micro-ondes de longueur d'onde  $\lambda$  est étudiée sur une fente double dont l'écart  $d$  s'élève à plusieurs centimètres. Pour la diffraction par la fente double, on obtient une répartition type de l'intensité (voir fig. 1) avec des maxima dans les angles  $\alpha_m$ , qui satisfont à la condition

$$(1) \quad \sin \alpha_m = m \cdot \frac{\lambda}{d}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Apparemment, l'intensité maximale est mesurée précisément au moment où le récepteur se trouve derrière la traverse centrale et ne peut pas être illuminé par l'émetteur par le chemin direct. Ce phénomène peut s'expliquer par l'interférence des ondes partielles issues des deux fentes et prouve ainsi la nature ondulatoire des micro-ondes. La rotation du récepteur dans le sens du rayon permet de démontrer la polarisation linéaire des micro-ondes rayonnées. Dans le cas d'une orientation croisée de l'émetteur et du récepteur, l'intensité mesurée diminue jusqu'à zéro. Lorsqu'on place une grille de polarisation dans la marche des rayons dans un angle inférieur à 45°, le récepteur reçoit de nouveau une onde, certes de faible amplitude. La grille laisse passer la composante du vecteur E de la micro-onde qui oscille parallèlement à la grille de polarisation, ce qui permet de mesurer la composante qui oscille parallèlement au récepteur.

REMARQUE

Le même équipement permet également de réaliser des expériences sur l'absorption, la réflexion, la réfraction et la polarisation de micro-ondes.

EVALUATION

On reporte l'angle  $\alpha_m$  de maxima de diffraction dans un diagramme  $\sin \alpha_m - m$  en fonction de l'ordre de diffraction  $m$ .

Les valeurs de mesure se situent sur une droite passant par l'origine dont la pente correspond au quotient  $\lambda/d$ .

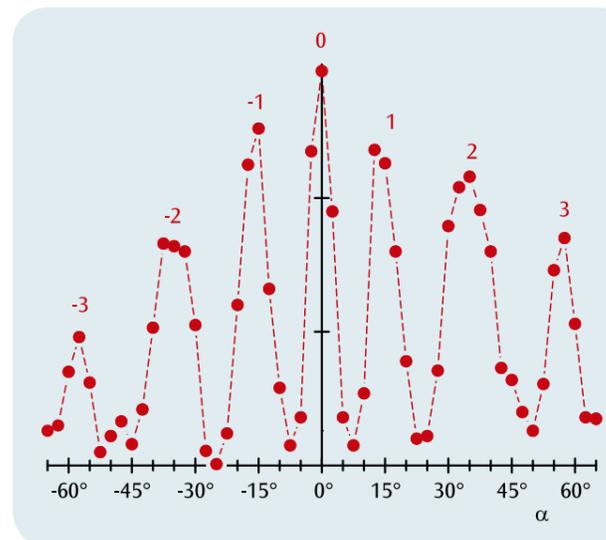


Fig. 1 Répartition de l'intensité en cas de diffraction des ondes centimétriques par une fente double

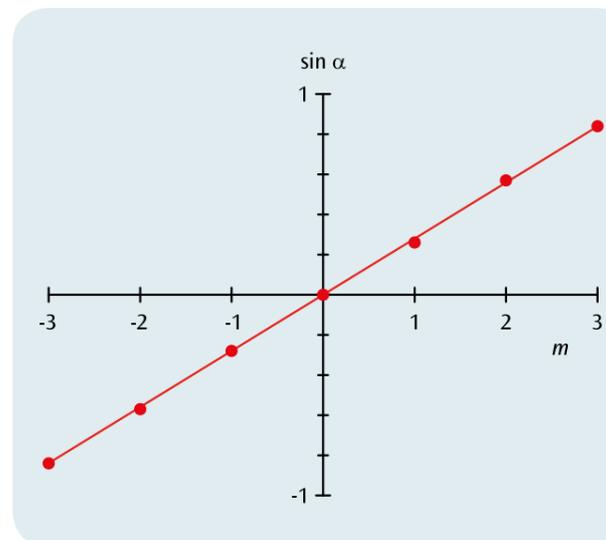


Fig. 2 Position des maxima d'intensité comme fonction de l'ordre de diffraction  $m$



## EXERCICES

- Enregistrement des caractéristiques d'une diode avec trois tensions cathodiques différentes.
- Identification des zones de charge spatiale et de saturation.
- Confirmation de la loi de *Schottky-Langmuir*.

## OBJECTIF

Enregistrement de la caractéristique d'une diode

## RESUME

Dans une diode, un courant d'émission porté par des électrons libres passe entre la cathode et l'anode lorsqu'une tension positive est appliquée entre la cathode et l'anode. Le courant augmente au fur et à mesure qu'augmente la tension, jusqu'à saturation, mais devient nul lorsque la tension est négative.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                                    | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Diode S                                     | 1000613    |
| 1      | Support pour tube S                         | 1014525    |
| 1      | Alimentation CC 0 – 500 V (230 V, 50/60 Hz) | 1003308 ou |
|        | Alimentation CC 0 – 500 V (115 V, 50/60 Hz) | 1003307    |
| 1      | Multimètre analogique AM50                  | 1003073    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm        | 1002843    |

# 1

## GENERALITES

Une diode est un récipient en verre sous vide contenant deux électrodes : une cathode chauffée, libérant des électrons par l'effet thermoionique, et une anode (cf. Fig. 1). Par une tension positive entre la cathode et l'anode, un courant d'émission porté par les électrons libres est généré vers l'anode (courant anodique). Si cette tension est faible, le courant anodique est retenu par la charge spatiale des électrons libres, car ceux-ci blindent le champ électrique devant la cathode. Au fur et à mesure qu'augmente la tension anodique, les lignes de champ pénètrent plus profondément dans l'espace devant la cathode et le courant anodique augmente, jusqu'à ce que la charge spatiale devant la cathode soit éliminée et que la valeur de saturation du courant anodique soit ainsi atteinte. En revanche, les électrons ne peuvent accéder à l'anode que si la tension négative appliquée à l'anode est suffisamment grande. Dans ce cas, le courant anodique est nul.

Le rapport entre le courant anodique  $I_A$  et la tension anodique  $U_A$  est appelé caractéristique de diode (cf. Fig. 2). On distingue les zones de contre-tension (a), de charge spatiale (b) et de saturation (c). Dans la zone de contre-tension, l'anode se trouve face à la cathode sur un potentiel négatif. Les électrons ne peuvent pas pénétrer dans le champ électrique. Dans la zone de charge spatiale, le rapport entre le courant et la tension anodiques est décrit par la loi de *Schottky-Langmuir*:

$$(1) \quad I_A \sim U_A^{\frac{3}{2}}$$

Dans la zone de saturation, le courant anodique dépend de la température de la cathode. Elle peut être élevée par l'augmentation de la tension de chauffage  $U_f$ .

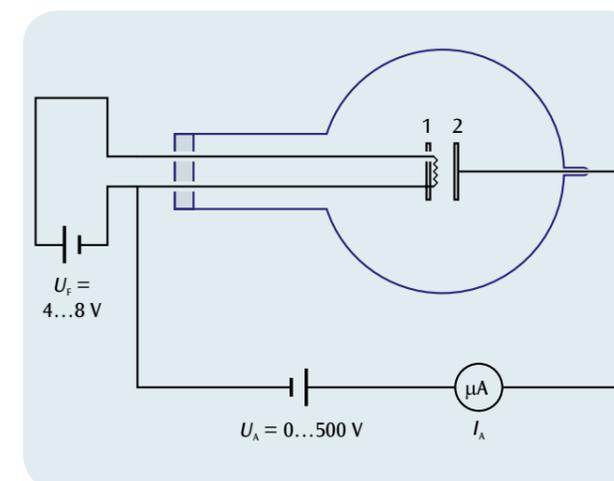


Fig. 1 Montage permettant d'enregistrer la caractéristique d'une diode  
1 : Cathode, 2 : Anode

## EVALUATION

### Zone de contre-tension :

Comme les électrons sortent de la cathode avec une énergie cinétique  $E_{kin} > 0$ , un courant anodique passera jusqu'à ce que la tension anodique soit suffisamment importante pour que même les électrons les plus rapides ne puissent plus atteindre l'anode.

### Zone de charge spatiale :

En présence de faibles intensités de champ, tous les électrons quittant la cathode ne peuvent pas être poursuivis. Ils entourent la cathode, comme un nuage, et forment une charge spatiale négative. En présence de petites tensions, les lignes de champ sortant de l'anode terminent leur course sur les électrons de la charge spatiale, et non sur la cathode. Le champ provenant de l'anode est ainsi blindé. Au fur et à mesure qu'augmente la tension, les lignes de champ pénètrent toujours plus profondément dans l'espace autour de la cathode et le courant anodique augmente, jusqu'à ce que la charge spatiale autour de la cathode ait disparu. La valeur de saturation du courant anodique est alors atteinte.

### Zone de saturation :

Ici le courant d'émission dépend de la tension anodique. Mais on peut aussi l'augmenter en élevant le nombre d'électrons sortant de la cathode par unité de temps. Pour ce faire, on peut augmenter la température de la cathode. Ainsi la valeur du courant de saturation dépend de la tension de chauffage.

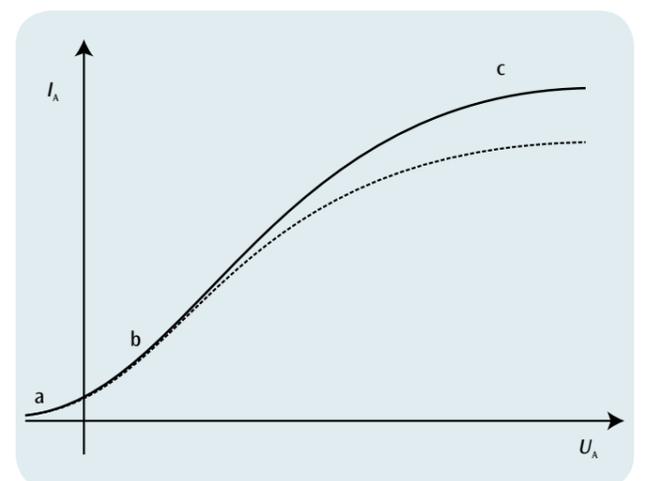


Fig. 2 Caractéristique d'une diode  
a : Zone de contre-tension, b : Zone de charge spatiale, c : Zone de saturation



## EXERCICES

- Enregistrement des caractéristiques du courant et de la tension anodique d'une triode avec plusieurs tensions de grille constantes.
- Enregistrement des caractéristiques du courant anodique et de la tension de grille d'une triode avec plusieurs tensions anodiques constantes.

## OBJECTIF

Enregistrement du réseau de caractéristiques d'une triode

## RESUME

Dans une triode, un courant d'émission porté par des électrons libres passe entre la cathode et l'anode lorsqu'une tension positive est appliquée entre la cathode et l'anode. Ce courant peut être commandé par une petite tension positive et négative entre la cathode et la grille.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                                    | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Triode S                                    | 1000614    |
| 1      | Support pour tube S                         | 1014525    |
| 1      | Alimentation CC 0 – 500 V (230 V, 50/60 Hz) | 1003308 ou |
|        | Alimentation CC 0 – 500 V (115 V, 50/60 Hz) | 1003307    |
| 1      | Multimètre analogique AM50                  | 1003073    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm        | 1002843    |

# 1

## GENERALITES

Une triode est un récipient en verre sous vide contenant deux électrodes : une cathode chauffée, libérant des électrons par l'effet thermoionique, une anode et, entre les deux, une grille. Si la tension positive entre la cathode et l'anode (tension anodique) est suffisamment grande, des électrons libres passent de la cathode à l'anode en traversant la grille. Le courant anodique ainsi généré peut être commandé par la variation d'une tension supplémentaire entre la cathode et la grille (tension de grille). Selon que la grille se trouve en face de la cathode sur un potentiel positif ou négatif, le courant anodique est amplifié ou affaibli. Ainsi une triode peut être utilisée pour amplifier des tensions alternatives.

L'expérience permet d'enregistrer le réseau de caractéristiques d'une triode. On entend par là le rapport entre le courant anodique  $I_A$  et les tensions anodique  $U_A$  et de la grille  $U_G$ . Deux variantes (cf. Fig. 2 et 3) sont usuelles pour représenter ce réseau de caractéristiques : la variante 1 représente le courant anodique en fonction de la tension anodique avec différentes tensions de grille constantes, la variante 2 le courant anodique en fonction de la tension de grille avec différentes tensions anodiques constantes.

## EVALUATION

Le courant anodique augmente au fur et à mesure qu'augmentent les tensions anodique et de la grille. Une très faible variation de la tension de quelques volts entraîne de grandes modifications du courant anodique. Aussi la tension de grille peut être utilisée pour contrôler le courant anodique.

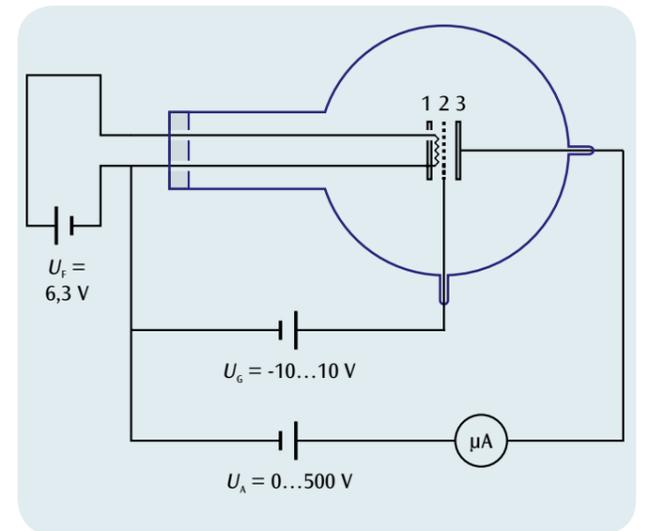


Fig. 1 Montage permettant d'enregistrer le réseau de caractéristiques d'une triode 1 : Cathode, 2 : Grille, 3 : Anode

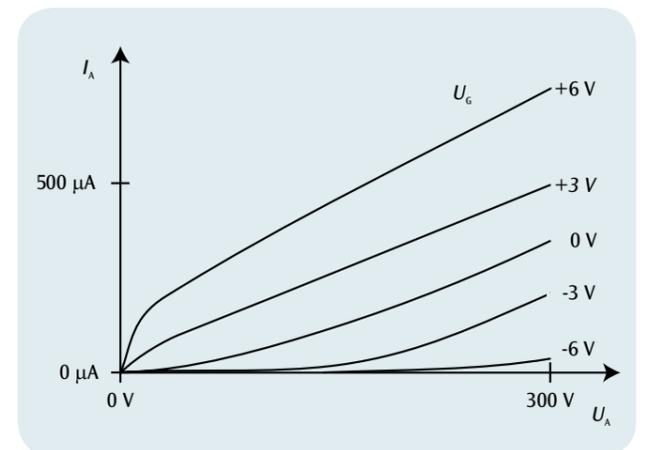


Fig. 2 Caractéristiques du courant et de la tension anodiques

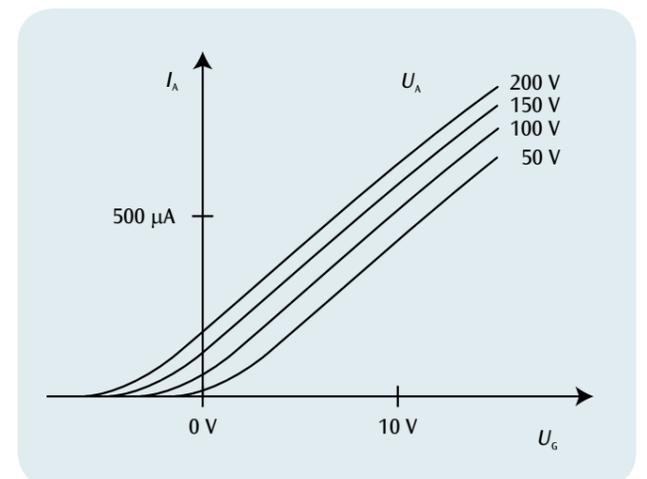
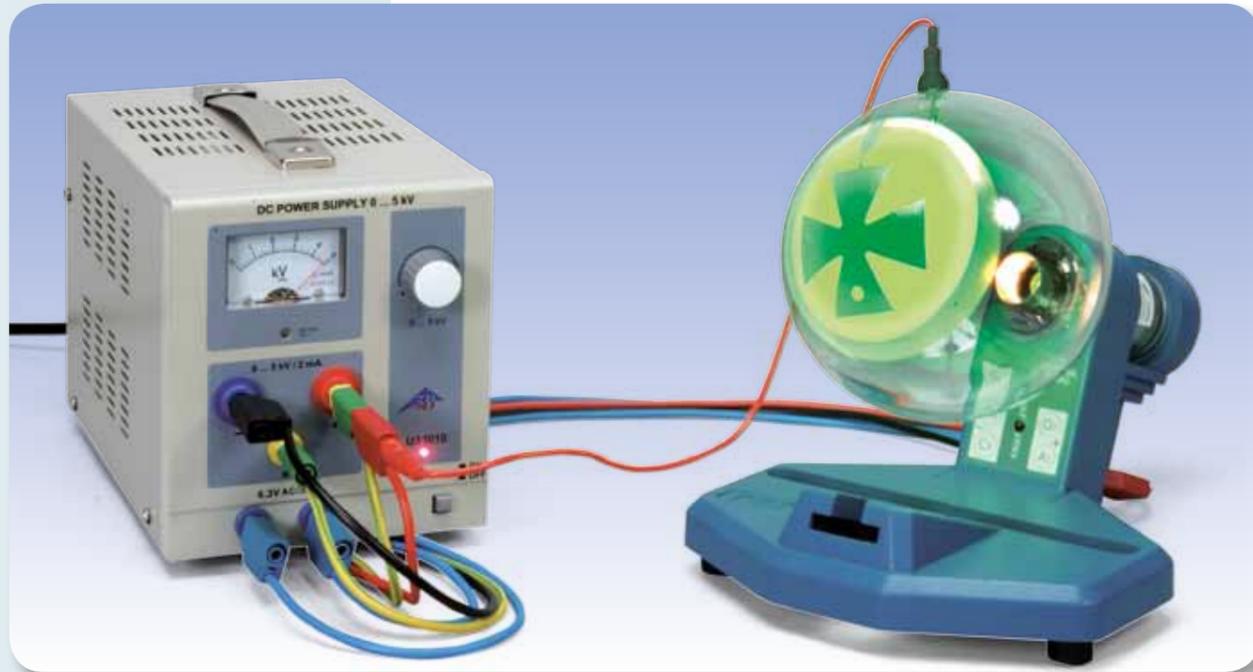


Fig. 3 Caractéristiques du courant anodique et de la tension de grille



## EXERCICES

- Démonstration de la propagation linéaire d'électrons dans un espace exempt de champ.
- Démonstration de la déviation d'électrons dans un champ magnétique.
- Introduction à l'optique électronique.

## OBJECTIF

Démonstration de la propagation linéaire d'électrons dans un espace exempt de champ

## RESUME

La propagation linéaire d'électrons dans un espace exempt de champ est démontrée dans le tube à croix de Malte par la coïncidence de l'ombre produite par les électrons avec l'ombre produite par la lumière. Une perturbation de la propagation linéaire, par ex. due à l'application d'un champ magnétique, se traduit par le déplacement de l'ombre des électrons.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre                          | Appareil  | Référence  |
|---------------------------------|---|------------|
| 1                               | Tube à croix de Malte S                             | 1000011    |
| 1                               | Support pour tube S                                 | 1014525    |
| 1                               | Alimentation haute tension 5 kV (230 V, 50/60 Hz)   | 1003310 ou |
|                                 | Alimentation haute tension 5 kV (115 V, 50/60 Hz)   | 1003309    |
| 1                               | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm                | 1002843    |
| <b>En plus nécessairement :</b> |   |            |
| 1                               | Paire de bobines de Helmholtz S                     | 1000611    |
| 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    |

# 1

## GENERALITES

Dans un tube à croix de Malte, le faisceau divergent d'un canon électronique apparaît sur un écran luminescent sous forme d'image lumineuse dans laquelle un obstacle imperméable aux électrons (croix de Malte) projette une ombre. La position de l'ombre se modifie lorsque la propagation linéaire des électrons est perturbée sur son trajet vers l'écran luminescent.

Si l'anode et la croix de Malte sont au même potentiel, l'espace est exempt de champ et les électrons se propagent en suivant un trajet linéaire. Dans ce cas, l'ombre de la croix de Malte coïncide avec l'ombre qui résulte de la lumière émise par la cathode.

La perturbation de la propagation linéaire dans un espace non exempt de champ est facile à démontrer. Il suffit d'interrompre la liaison conductrice entre l'anode et l'obstacle : la charge statique de l'obstacle qui en résulte provoque une ombre électronique floue à l'écran.

Lorsque les électrons sont déviés dans un champ magnétique sur leur trajet vers l'écran, on observe un déplacement ou une rotation de l'ombre électronique.

La force de déviation  $F$  dépend de la vitesse  $v$  et du champ magnétique  $B$ , est imposée par la relation de Lorentz :

$$(1) \quad F = -e \cdot v \times B$$

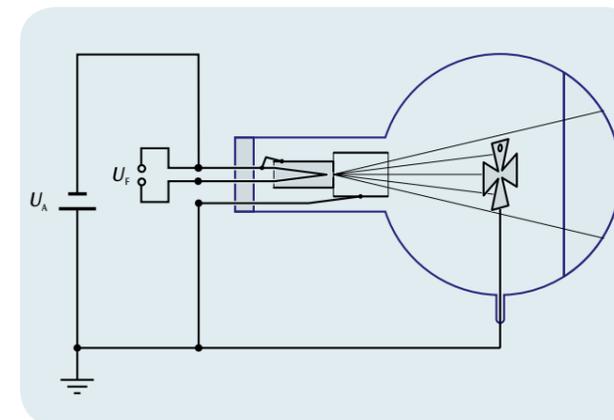


Fig. 1 Représentation schématique du tube à croix de Malte

## EVALUATION

Dans un espace exempt de champ, la propagation des électrons est linéaire. L'ombre électronique de la croix de Malte coïncide avec l'ombre produite par la lumière.

Dans un champ magnétique, les électrons sont déviés et l'ombre électronique est déplacée par rapport à l'ombre de la lumière. La force de déviation est perpendiculaire au sens de déplacement des électrons et au champ magnétique.

Si le champ magnétique se déplace dans le sens axial, les électrons sont déviés sur des trajectoires spiralées et l'ombre électronique est tournée et réduite.



Fig. 2 Rotation de l'ombre électronique par la déviation des électrons dans le champ magnétique axial



## EXERCICES

- Démonstration des émissions thermoélectriques de porteurs de charge provenant d'une cathode chauffée.
- Détermination de la polarité des porteurs de charge émis.
- Estimation de la charge spécifique des porteurs de charge.

## OBJECTIF

Détermination de la polarité des porteurs de charge

## RESUME

Dans les tubes de Perrin, l'application d'un champ magnétique homogène dévie le faisceau d'électrons vers une cage de Faraday. La charge des électrons peut être visualisée avec l'aide d'un électroscope relié à la cage de Faraday et leur polarité peut être étudiée par comparaison avec une charge à signé de polarité connu.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Tube de Perrin S                                    | 1000616    |
| 1      | Support pour tube S                                 | 1014525    |
| 1      | Paire de bobines de Helmholtz S                     | 1000611    |
| 1      | Alimentation haute tension 5 kV (230 V, 50/60 Hz)   | 1003310 ou |
|        | Alimentation haute tension 5 kV (115 V, 50/60 Hz)   | 1003309    |
| 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    |
| 1      | Électroscope de Kolbe                               | 1001027    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm                | 1002843    |

# 1

## GENERALITES

Dans le tube de Perrin, un faisceau concentré d'électrons est projeté contre un écran fluorescent et peut y être observé sous forme de petite tâche lumineuse. Une cage de Faraday est montée à un angle de 45° par rapport au faisceau d'électrons ; elle reçoit les électrons qui peuvent être déviés du faisceau par l'application d'un champ magnétique. Le courant de charge peut être mesuré via un raccordement séparé.

Dans cette expérience, le faisceau d'électrons sera dévié par le champ magnétique homogène d'une paire de bobines de Helmholtz vers la cage de Faraday qui est raccordée à un électroscope. La charge ou la décharge de l'électroscope par le faisceau d'électrons dévié vers la cage de Faraday permet de déterminer la polarité des porteurs de charge.

En outre, il est possible d'estimer la charge spécifique des porteurs de charge puisque le rayon de courbure  $r$  de la trajectoire dans la cage de Faraday est connu. Sur cette trajectoire, la force centripète agissant sur les porteurs de charge est indiquée par la force de Lorentz. Ainsi,

$$(1) \quad m \cdot \frac{v^2}{r} = e \cdot v \cdot B$$

$e$ : Charge,  $m$ : Masse du porteur de charge,  $B$ : Champ magnétique

Ici, la vitesse  $v$  des porteurs de charge dépend de la tension d'anode  $U_A$  :

$$(2) \quad v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A}$$

Ceci induit, pour la charge spécifique des porteurs de charge :

$$(3) \quad \frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_A}{(B \cdot r)^2}$$

## EVALUATION

Le rayon de courbure  $r$  de la trajectoire vers la cage de Faraday est de 160 mm. La haute tension  $U_A$  est connue.

Le champ magnétique  $B$  est généré par une paire de bobines de Helmholtz et s'avère proportionnel au courant  $I_H$  traversant une seule bobine. Le coefficient de proportionnalité  $k$  peut être calculé à partir du rayon de bobine  $R = 68$  mm et du nombre de spires  $N = 320$  par bobine :

$$B = k \cdot I_H \quad \text{avec} \quad k = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{N}{R}$$

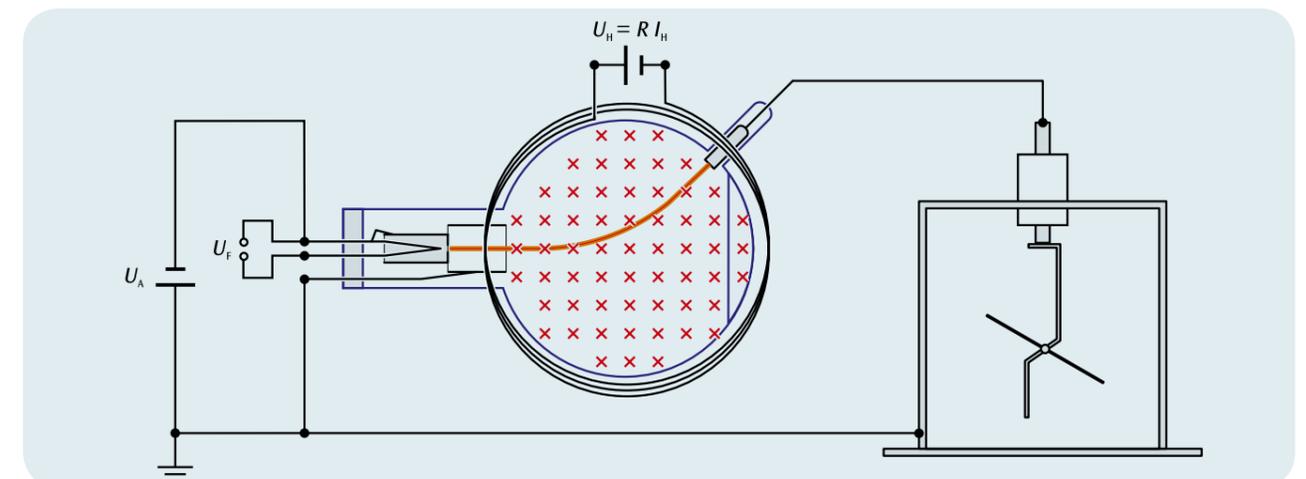


Fig. 1 Représentation schématique du tube de Perrin



## EXERCICES

- Etude de la déviation d'un faisceau électronique dans un champ magnétique.
- Evaluation de la charge spécifique de l'électron.
- Etude de la déviation d'un faisceau électronique dans un champ électrique.
- Montage d'un filtre de vitesse d'un champ électrique et d'un champ magnétique croisés.

## OBJECTIF

Etude de la déviation d'électrons dans un champ électrique et magnétique

## RESUME

Dans le tube de Thomson, la déviation verticale d'un faisceau électronique horizontal est visible sur un écran luminescent. La déviation peut être produite par un champ électrique vertical ou un champ magnétique horizontal disposé dans le plan horizontal perpendiculairement au sens du faisceau.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Tube de Thomson S                                 | 1000617    |
| 1      | Support pour tube S                               | 1014525    |
| 1      | Paire de bobines de Helmholtz S                   | 1000611    |
| 1      | Alimentation haute tension 5 kV (230 V, 50/60 Hz) | 1003310 ou |
|        | Alimentation haute tension 5 kV (115 V, 50/60 Hz) | 1003309    |
| 1      | Alimentation CC 0 – 500 V (230 V, 50/60 Hz)       | 1003308 ou |
|        | Alimentation CC 0 – 500 V (115 V, 50/60 Hz)       | 1003307    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm              | 1002843    |

# 2

## GENERALITES

Dans le tube de Thomson, les électrons traversent horizontalement un diaphragme à fente placé en aval de l'anode et rencontrent un écran luminescent qui, placé de biais dans la marche du rayon, rend le faisceau visible. Derrière le diaphragme se trouve un condensateur à plaques, dans le champ électrique vertical duquel les électrons sont déviés verticalement. Par ailleurs, les bobines de Helmholtz permettent de créer un champ magnétique horizontal perpendiculaire au sens du faisceau, dans lequel les électrons sont également déviés verticalement :

La force de Lorentz agit sur un électron qui bouge à la vitesse  $v$  à travers un champ magnétique  $B$

$$(1) \quad F = -e \cdot v \times B$$

$e$ : Charge élémentaire

perpendiculairement au plan résultant du sens de mouvement et du champ magnétique. La déviation est verticale lorsque le sens du mouvement et le champ magnétique se situent dans le plan horizontal (cf. Fig. 1). Si le sens du mouvement est perpendiculaire au champ magnétique homogène, les électrons sont forcés sur une trajectoire circulaire dont la force centripète est imposée par la force de Lorentz.

$$(2) \quad m \cdot \frac{v^2}{r} = e \cdot v \cdot B$$

$m$ : Masse électronique,  $r$ : Rayon de la trajectoire circulaire.

La vitesse des électrons dépend de la tension anodique d'accélération  $U_A$ . On a donc :

$$(3) \quad v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_A}$$

Le rayon de la trajectoire circulaire permet de déterminer la charge spécifique de l'électron, dans la mesure où le champ magnétique homogène  $B$  et la tension anodique  $U_A$  sont connus. Les équations (2) et (3) permettent d'établir la charge spécifique de l'électron :

$$(4) \quad \frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_A}{(B \cdot r)^2}$$

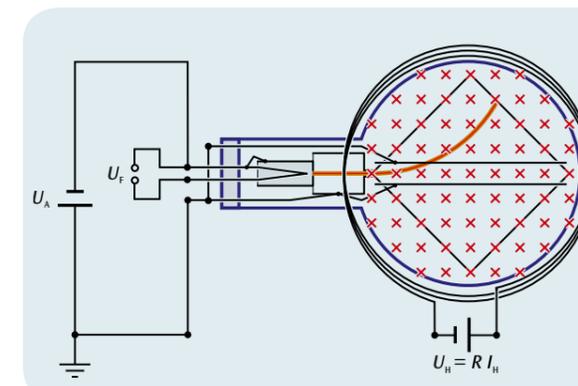


Fig. 1 Représentation schématique du tube de Thomson dans le champ magnétique

Lorsqu'une tension  $U_p$  est appliquée au condensateur à plaques, les électrons sont déviés verticalement dans son champ électrique vertical  $E$  avec la force

$$(5) \quad F = -e \cdot E$$

$e$ : Charge élémentaire

(cf. Fig. 2). Aussi le champ électrique peut-il être choisi de manière à ce qu'il compense juste la déviation dans le champ magnétique :

$$(6) \quad e \cdot E + e \cdot v \cdot B = 0$$

Dans ce cas, il est aisé de déterminer la vitesse des électrons. On a donc :

$$(7) \quad v = \frac{E}{B}$$

Un agencement de champs électrique et magnétique croisés dans lequel la déviation des électrons est compensée à zéro, est appelé un filtre de vitesse.

## EVALUATION

Généré dans une paire de bobines de Helmholtz, le champ magnétique  $B$  est proportionnel au courant  $I_H$  par une seule bobine. Le facteur de proportionnalité  $k$  peut être calculé à partir du rayon de la bobine  $R = 68 \text{ mm}$  et du nombre de spires  $N = 320$  par bobine :

$$B = k \cdot I_H \quad \text{avec} \quad k = \left(\frac{4}{5}\right)^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{N}{R}$$

Le champ électrique peut être calculé à partir de la tension  $U_p$  et de l'écartement des plaques  $d$  :

$$E = \frac{U_p}{d}$$

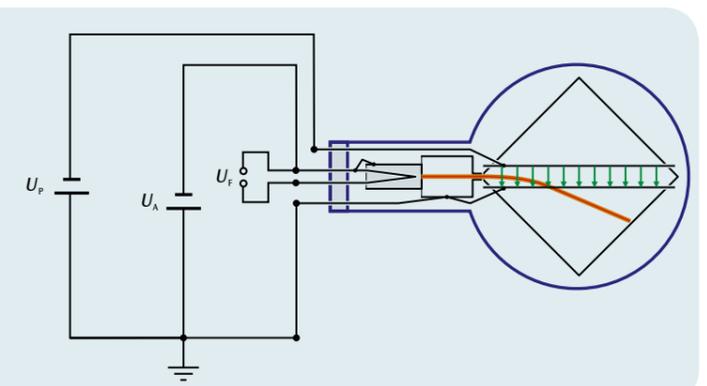
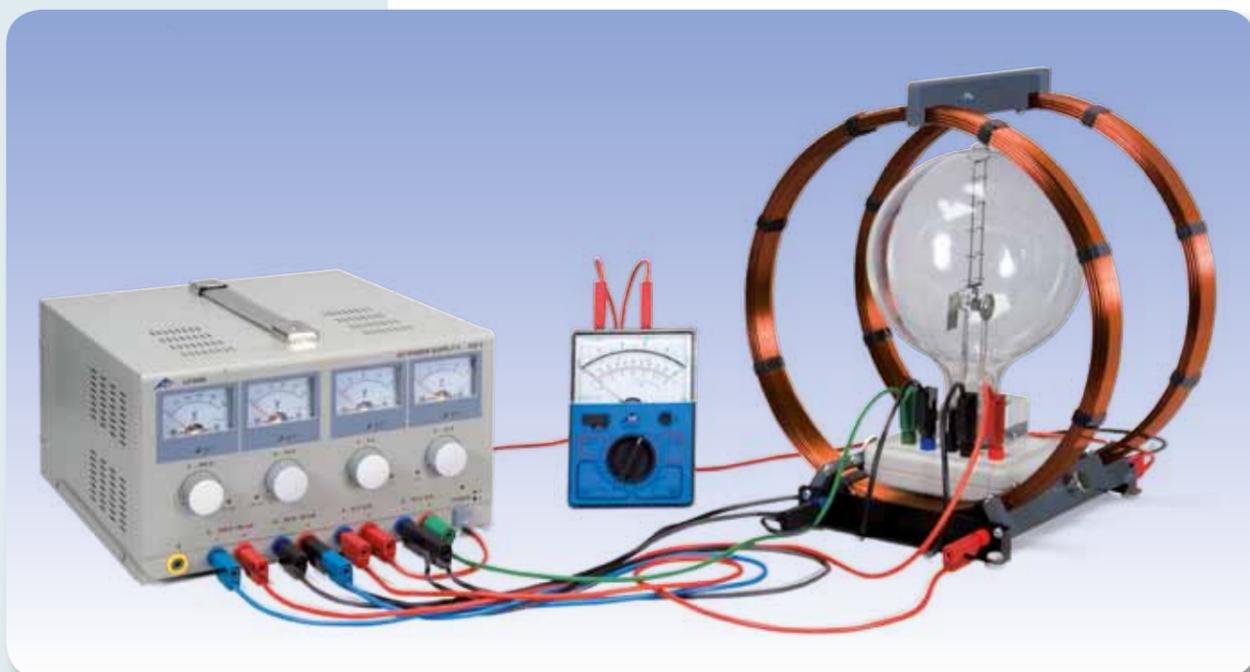


Fig. 2 Représentation schématique du tube de Thomson dans le champ électrique



## EXERCICES

- Démonstration de la déviation des électrons dans un champ magnétique homogène sur une trajectoire circulaire fermée.
- Détermination du courant des bobines de Helmholtz  $I_H$  en fonction de la tension d'accélération  $U$  du canon électronique à rayon de trajectoire constant  $r$ .

## OBJECTIF

Détermination de la charge spécifique de l'électron

## RESUME

Dans le tube à pinceau étroit, la trajectoire circulaire des électrons dans un champ magnétique homogène peut être observée sous la forme d'une trace lumineuse très nette. Aussi le rayon de la trajectoire peut-il être mesuré directement avec une règle graduée. A partir du rayon de la trajectoire  $r$ , du champ magnétique  $B$  et de la tension d'accélération  $U$  du canon électronique, on peut calculer la charge spécifique  $e/m$  de l'électron.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                                     | Référence  |
|--------|--|------------|
| 1      | Tube à pinceau étroit sur socle de connexion | 1000904    |
| 1      | Bobines de Helmholtz 300 mm                  | 1000906    |
| 1      | Alimentation CC 0 – 500 V (230 V, 50/60 Hz)  | 1003308 ou |
|        | Alimentation CC 0 – 500 V (115 V, 50/60 Hz)  | 1003307    |
| 1      | Multimètre analogique AM50                   | 1003073    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm         | 1002843    |

2

## GENERALITES

Dans un tube à pinceau étroit, les électrons se déplacent sur une trajectoire circulaire dans un champ magnétique homogène. Le tube contient du néon, dont la pression est réglée avec précision, et les atomes gazeux sont ionisés le long de la trajectoire par la collision des électrons et excités à briller. Ainsi la trajectoire des électrons est visible indirectement et son rayon peut être mesuré à l'aide d'une règle graduée. Comme la tension d'accélération  $U$  du canon électronique et le champ magnétique  $B$  sont connus, le rayon de la trajectoire  $r$  permet de calculer la charge spécifique  $e/m$  de l'électron :

La force de Lorentz agit perpendiculairement à la vitesse et au champ magnétique sur un électron qui bouge à la vitesse  $v$  perpendiculairement à un champ magnétique homogène  $B$ .

$$(1) \quad F = e \cdot v \cdot B$$

$e$ : Charge élémentaire

En tant que force centripète, elle oblige l'électron

$$(2) \quad F = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

$m$ : Masse électronique

de suivre une trajectoire circulaire de rayon  $r$ . Aussi

$$(3) \quad e \cdot B = \frac{m \cdot v}{r}$$

La vitesse  $v$  dépend de la tension d'accélération  $U$  du canon électronique :

$$(4) \quad v = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U}$$

Pour la charge spécifique de l'électron, on a donc :

$$(5) \quad \frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U}{(r \cdot B)^2}$$

## EVALUATION

Généré dans une paire de bobines de Helmholtz, le champ magnétique  $B$  est proportionnel au courant  $I_H$  passant dans une bobine. Le facteur de proportionnalité  $k$  peut être calculé à partir du rayon de la bobine  $R = 147,5$  mm et du nombre de spires  $N = 124$  par bobine :

$$B = k \cdot I_H \quad \text{avec} \quad k = \left(\frac{4}{5}\right)^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{N}{R}$$

Toutes les grandeurs permettant de déterminer la charge spécifique des électrons sont ainsi connues.

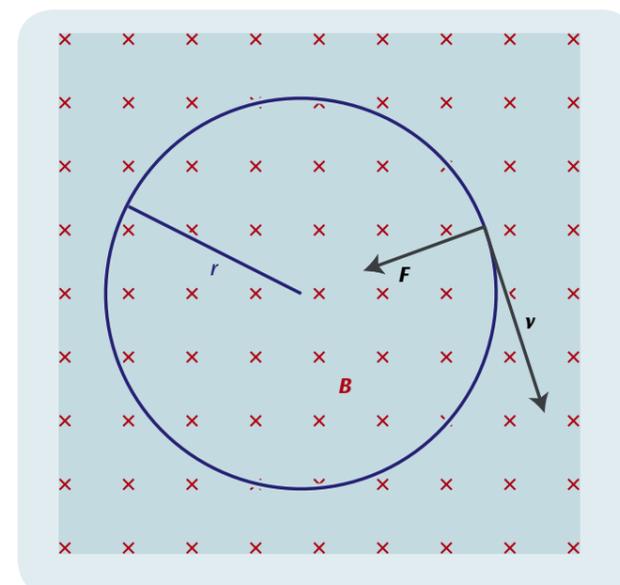


Fig. 1 Déviation d'électrons à vitesse  $v$  dans un champ magnétique  $B$  par la force de Lorentz  $F$  sur une trajectoire circulaire de rayon  $r$



Fig. 2 Tube à pinceau étroit avec trace lumineuse circulaire des électrons dans le champ magnétique



## EXERCICES

- Etude de la déviation d'un faisceau d'électrons dans un champ électrique.
- Etude de la déviation d'un faisceau d'électrons dans un champ magnétique.
- Démonstration de la représentation oscilloscopique à l'exemple des signaux périodiques d'un générateur de fonctions.
- Calibrage de l'actionneur de fréquence du générateur de dents de scie.

## OBJECTIF

Etude des principes physiques fondamentaux pour la représentation oscilloscopique à résolution dans le temps des signaux électriques

## RESUME

L'oscilloscope didactique permet d'étudier les principes physiques fondamentaux de la représentation à résolution dans le temps de signaux électriques sur un écran fluorescent. Dans un tube de Braun, un faisceau focalisé d'électrons sera généré et son point d'impact sur l'écran pourra être observé sous la forme d'une tâche lumineuse verte. Dévié par une tension en dents de scie sur une paire de plaques, le faisceau d'électrons se déplace à vitesse constante de gauche à droite pour revenir d'un saut à son point d'origine. Ce processus se répète de manière périodique avec une fréquence réglable. La tension dépendant de la durée devant être représentée alimente une bobine à l'extérieur du tube et provoque une déviation verticale du faisceau dans le champ magnétique de la bobine. Sa dépendance au temps est déclenchée par le déplacement horizontal simultané du faisceau d'électrons et rendue visible sur l'écran fluorescent.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil   | Référence  |
|--------|--|------------|
| 1      | Oscilloscope didactique                          | 1000902    |
| 1      | Alimentation CC 0 – 500 V (230 V, 50/60 Hz)      | 1003308 ou |
|        | Alimentation CC 0 – 500 V (115 V, 50/60 Hz)      | 1003307    |
| 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      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm             | 1002843    |

# 2

## GENERALITES

L'oscilloscope à faisceau de cathode avec tube de Braun, comme composant majeur, est l'une des applications importantes de l'émission thermoionique sous vide poussé. Dans la version oscilloscope didactique, une cathode émettrice entourée d'un cylindre de Wehnelt et une plaque trouée sur l'anode de potentiel constituent le système électro-optique du tube de Braun visible de l'extérieur. Une partie des électrons accélérés vers l'anode traversent la plaque trouée et forment un faisceau qui peut être observé sur l'écran fluorescent du tube sous la forme d'une tâche lumineuse verte. Comme les tubes sont remplis de néon à faible pression, le faisceau d'électrons sera focalisé par des impulsions avec les atomes de gaz et sera visible simultanément sous forme de fils lumineux de couleur rouge. L'alimentation d'une tension négative sur le cylindre de Wehnelt contribue également à la focalisation. Pour des raisons de simplicité et de lisibilité, nous avons renoncé à des équipements supplémentaires pour l'accélération postérieure et la focalisation du faisceau que l'on trouve habituellement sur les oscilloscopes.

Derrière l'anode se trouve une paire de plaque orientée de manière parallèle au faisceau d'électrons et qui peut être raccordée au générateur de dents de scie (cf. illustration 1). Grâce au champ électrique de la tension en dents de scie  $U_x(t)$ , le faisceau est dévié de manière horizontale et se déplace sur l'écran fluorescent avec une vitesse constante de gauche à droite, pour revenir ensuite au point de départ. Ce processus se répète de manière périodique avec une fréquence réglable.

Pendant son mouvement de gauche à droite, le faisceau d'électrons peut en outre être dévié de manière verticale dans un champ magnétique en appliquant une tension  $U_y(t)$  dans la bobine à l'extérieur du tube. Si cette tension est modifiée en fonction de la durée, la modification sera visualisée avec résolution dans le temps sur l'écran fluorescent (cf. illustration 2). De telles tensions dépendant de la durée peuvent par exemple être les signaux de sortie périodiques d'un générateur de fonctions ou bien également les signaux amplifiés d'un microphone. L'expérience étudie les signaux périodiques d'un générateur de fonctions. Pour une représentation optimale, la fréquence en dents de scie est choisie dans un rapport en chiffres entiers par rapport à la fréquence du générateur de fonctions.

## EVALUATION

Si une période du signal émis par le générateur de fonctions est exactement représenté sur l'écran fluorescent, cela signifie que sa fréquence coïncide avec celle de la dent de scie.

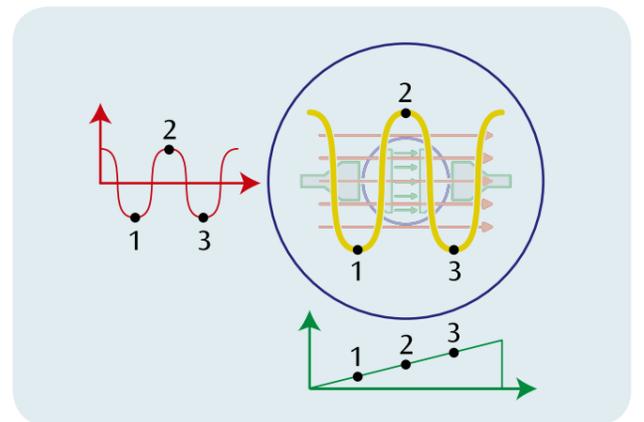


Fig. 2 Représentation à résolution dans le temps d'un signal périodique

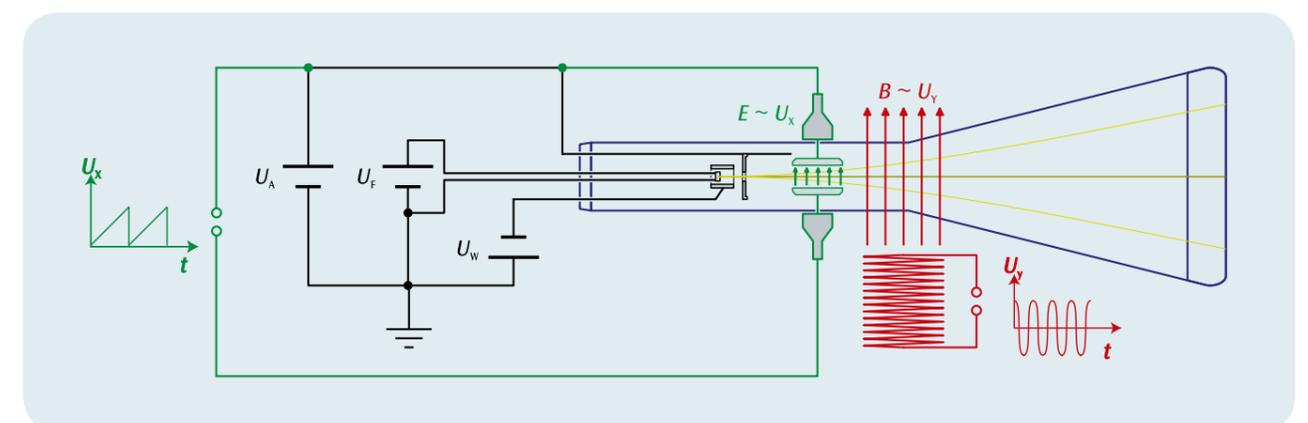
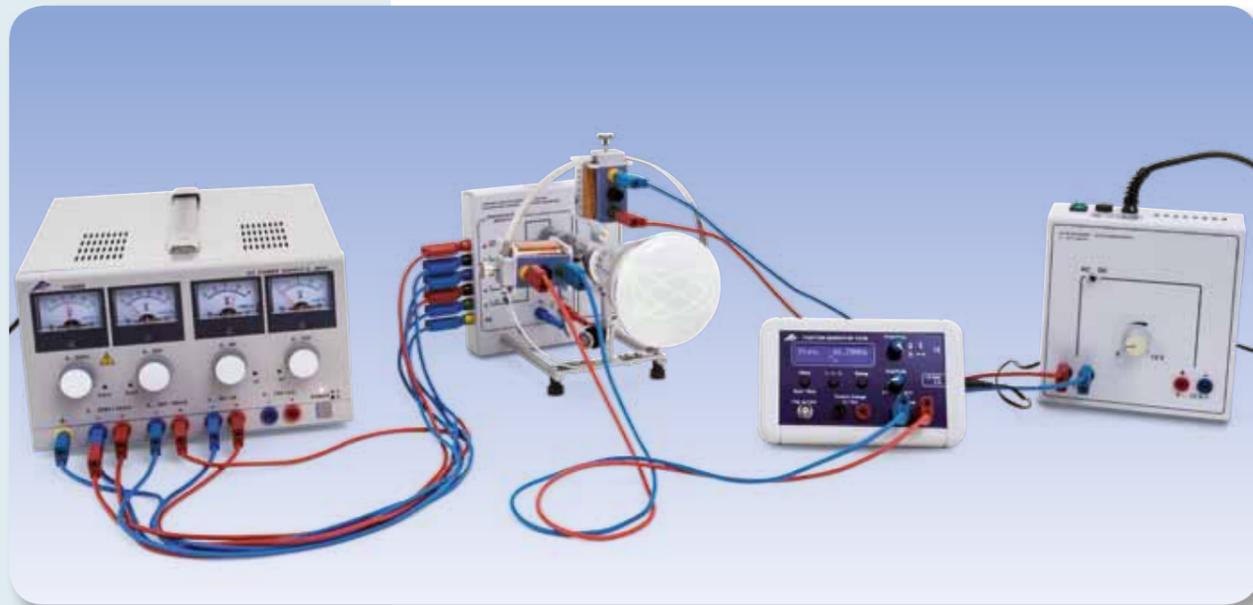


Fig. 1 Représentation schématique de l'oscilloscope didactique, vu de dessus



## EXERCICES

- Superposition de champs magnétiques alternatifs de fréquences identique et différente et observation du déplacement du point lumineux du tube.
- Production de courbes de Lissajous fermées.
- Contrôle de la fréquence de réseau.

## OBJECTIF

Démonstration de la superposition non parasitée de champs magnétiques sous vide

## RESUME

Un tube de Braun permet de démontrer la superposition non parasitée de champs magnétiques sous vide. Pour cela, l'on observe les déplacements du point lumineux sur l'écran fluorescent du tube. Les expériences peuvent être étendues aux champs magnétiques alternatifs avec fréquences identiques et différentes. Les courbes de Lissajous que l'on peut observer sur l'écran fluorescent dépendent fortement du rapport de fréquence entre les deux champs magnétiques, ainsi que de leur position de phase.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Oscilloscope didactique                                   | 1000902    |
| 1      | Alimentation CC 0 – 500 V (230 V, 50/60 Hz)               | 1003308 ou |
|        | Alimentation CC 0 – 500 V (115 V, 50/60 Hz)               | 1003307    |
| 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      | Alimentation CA/CC 0 – 12 V, 3 A, stab. (230 V, 50/60 Hz) | 1001007 ou |
|        | Alimentation CA/CC 0 – 12 V, 3 A, stab. (115 V, 50/60 Hz) | 1001006    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm                      | 1002843    |

2

## GENERALITES

Le tube de Braun permet de démontrer le principe de superposition de champs magnétiques sous vide en étudiant la déviation du faisceau d'électrons du tube dans le champ magnétique. L'expérience peut être réalisée en particulier aussi pour les champs magnétiques alternatifs puisque le faisceau d'électrons suit presque sans inertie les modifications du champ magnétique.

Dans l'expérience, deux bobines identiques alimentées en électricité sont montées hors du tube de Braun et la déviation du faisceau d'électrons dans les champs magnétiques des bobines sera observée sous la forme de déplacements du point lumineux sur l'écran fluorescent du tube. Alors que le champ magnétique de la bobine horizontale entraîne un déplacement vertical, la bobine verticale entraîne un déplacement horizontal.

En raison d'un champ magnétique alternatif à la fréquence du réseau, le point lumineux sera étiré sous forme d'un trait vertical ou horizontal. Si les deux bobines sont raccordées en parallèle à la source de courant alternatif, apparaît alors un trait droit à 45°, pour un raccordement non parallèle des bobines à -45°, de la verticale puisque les déplacements du point lumineux sont superposés par les deux champs magnétiques.

Les expériences peuvent être étendues aux champs magnétiques alternatifs avec fréquences différentes. Les courbes de Lissajous que l'on peut alors observer sur l'écran fluorescent dépendent fortement du rapport de fréquence entre les deux champs magnétiques, ainsi que de leur position de phase. Lorsque les fréquences entretiennent un rapport rationnel simple entre elles, des courbes fermées seront produites. Leur forme précise dépend encore de la différence de phase entre les champs magnétiques, comme le présente la figure 1 pour courbes de Lissajous avec un rapport de fréquences de 5:1.

Si le rapport de fréquences diffère ne serait-ce que légèrement d'un rapport rationnel simple, une courbe fermée sera alors générée dont les mouvements seront d'autant plus lents que la différence avec le rapport rationnel sera faible. Ceci sera utilisé dans l'expérience pour contrôler la fréquence de réseau. Pour cela, une bobine sera raccordée à un transformateur travaillant avec fréquence de réseau et la deuxième bobine, à un générateur de fonctions dont la fréquence de signal pourra être lue avec une précision élevée.

## EVALUATION

Conformément à la fréquence du réseau  $\nu$ , l'on recherchera la fréquence de générateur  $\nu_5$  pour laquelle la courbe de Lissajous correspondant au rapport de fréquence de 5:1 présentera les mouvements les plus lents. La fréquence de réseau  $\nu$  au moment de l'observation sera alors calculée comme suit :

$$\nu = \frac{\nu_5}{5}$$

Cette détermination est réalisée avec une précision de 0,01 Hz puisque  $\nu_5$  peut être réglé avec une précision de 0,05 Hz.

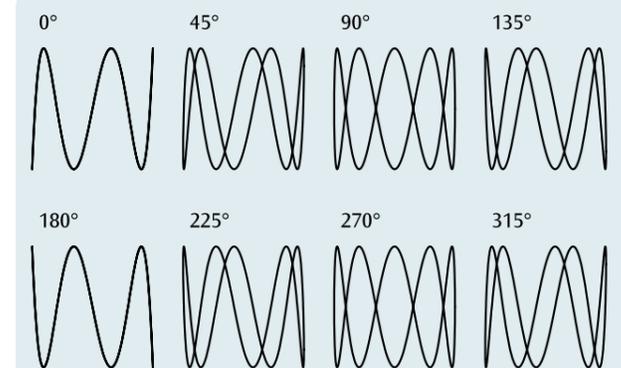
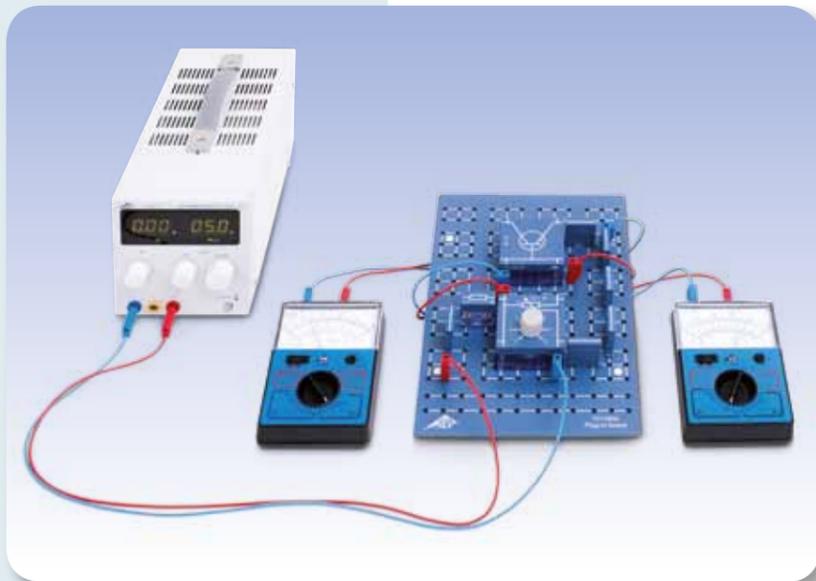


Fig. 1 Courbes de Lissajous pour un rapport de fréquence de 5:1 avec les différences de phases 0°, 45°, 90°, ...



**OBJECTIF**

Mesurer les caractéristiques significatives d'un transistor NPN

**RESUME**

Un transistor bipolaire est un composant électronique constitué de trois couches semi-conductrices dopées en alternance P et N : la base, le collecteur et l'émetteur. Selon l'agencement des couches, on parle d'un transistor NPN ou PNP. Le comportement d'un transistor bipolaire est caractérisé, entre autres, par la courbe d'entrée, de commande et de sortie qui, dans l'expérience, sera mesurée, représentée graphiquement et évaluée à titre d'exemple pour le transistor NPN.

**EXERCICES**

- Mesurer la caractéristique d'entrée, c'est-à-dire le courant de base  $I_B$  en fonction de la tension base-émetteur  $U_{BE}$ .
- Mesurer la caractéristique de commande, c'est-à-dire le courant de collecteur  $I_C$  en fonction du courant de base  $I_B$  à tension collecteur-émetteur fixe  $U_{CE}$ .
- Mesurer la caractéristique de sortie, c'est-à-dire le courant de collecteur  $I_C$  en fonction de la tension collecteur-émetteur  $U_{CE}$  à courant de base fixe  $I_B$ .

**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Plaque de connexion des composants                            | 1012902    |
| 1      | Jeu de 10 shunts, P2W19                                       | 1012985    |
| 1      | Résistance 1 kΩ, 2 W, P2W19                                   | 1012916    |
| 1      | Résistance 47 kΩ, 0,5 W, P2W19                                | 1012926    |
| 1      | Potentiomètre 220 Ω, 3 W, P4W50                               | 1012934    |
| 1      | Potentiomètre 1 kΩ, 1 W, P4W50                                | 1012936    |
| 1      | Transistor NPN BD 137, P4W50                                  | 1012974    |
| 1      | Alimentation CA/CC 0 – 12 V, 3 A (230 V, 50/60 Hz)            | 1002776 ou |
| 1      | Alimentation CA/CC 0 – 12 V, 3 A (115 V, 50/60 Hz)            | 1002775    |
| 3      | Multimètre analogique AM50                                    | 1003073    |
| 1      | Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 1 mm <sup>2</sup> | 1002840    |

**GENERALITES**

Un transistor bipolaire est un composant électronique constitué de trois couches semi-conductrices dopées en alternance P et N : la base B, le collecteur C et l'émetteur E. La base se trouve entre le collecteur et l'émetteur et sert de commande. Dans son principe, le transistor bipolaire correspond à deux diodes opposées dotées d'une anode ou d'une cathode commune. La bipolarité provient de la participation des électrons et des trous au transport des charges suite aux différents types de dopage.

Selon l'agencement des couches, on parle d'un transistor NPN ou PNP (Fig. 1). Selon les bornes entre lesquelles sont appliquées les tensions d'entrée et de sortie, le transistor bipolaire est exploité comme un quadripôle dans trois circuits de base : le circuit émetteur, le circuit collecteur et le circuit de base. Les désignations des circuits indiquent la borne commune de l'entrée et de la sortie.

Nous n'étudierons par la suite que le transistor NPN.

Selon le montage de la jonction base-émetteur ou base-collecteur dans le sens passant ( $U_{BE}, U_{BC} > 0$ ) ou bloquant ( $U_{BE}, U_{BC} < 0$ ), on obtient quatre modes de service du transistor NPN (voir Tab. 1). Dans le sens direct du transistor, la transition  $B_E$  ( $U_{BE} > 0$ ) polarisée dans le sens passant injecte des électrons de l'émetteur vers la base et des trous de la base vers l'émetteur. Comme le dopage de l'émetteur est nettement supérieur à celui de la base, la quantité d'électrons injectés dans la base est supérieure à

celle de trous injectés dans l'émetteur, minimisant par conséquent les recombinaisons. Comme la largeur de la base est bien plus petite que la longueur de diffusion des électrons, qui sont des porteurs de charges minoritaires dans la base, les électrons passent à travers la base dans la couche de blocage entre la base et le collecteur et dérivent vers le collecteur, car la couche de blocage ne représente un obstacle que pour les porteurs de charges majoritaires. Enfin, il se forme un courant de transfert  $I_T$  de l'émetteur dans le collecteur qui, en mode direct, représente une part essentielle du courant de collecteur  $I_C$ . Aussi, le transistor peut être considéré comme une source de courant commandée par la tension ; le courant  $I_C$  à la sortie peut être commandé par la tension  $U_{BE}$  à l'entrée. Les électrons recombinés dans la base sont évacués en tant que courant de base  $I_B$  de la base pour garantir un courant de transfert constant  $I_T$  et ainsi la stabilité du transistor. Un faible courant d'entrée  $I_B$  commande donc un grand courant de sortie  $I_C$  ( $I_C \approx I_T$ ) et il en résulte un gain de courant.

Le comportement d'un transistor bipolaire est caractérisé par quatre caractéristiques : entrée, commande, sortie et inverse (voir Tab. 2). Dans l'expérience, les caractéristiques d'entrée, de commande et de sortie sont mesurées et représentées graphiquement à titre d'exemple pour le transistor NPN.

Tab. 1 Les quatre modes de service d'un transistor NPN

| $U_{BE}$ | $U_{BC}$ | Mode de service                       |
|----------|----------|---------------------------------------|
| > 0      | < 0      | Sens direct/mode de service normal    |
| > 0      | > 0      | Saturation                            |
| < 0      | > 0      | Sens indirect/mode de service inverse |
| < 0      | < 0      | Mode bloquant                         |

Tab. 2 Les quatre caractéristiques d'un transistor NPN en marche avant

| Désignation                 | Dépendance       | Paramètre                |
|-----------------------------|------------------|--------------------------|
| Caractéristique d'entrée    | $I_B(U_{BE})$    |                          |
| Caractéristique de commande | $I_C(I_B)$       | $U_{CE} = \text{const.}$ |
| Caractéristique de sortie   | $I_C(U_{CE})$    | $I_B = \text{const.}$    |
| Caractéristique inverse     | $U_{BE}(U_{CE})$ | $I_B = \text{const.}$    |

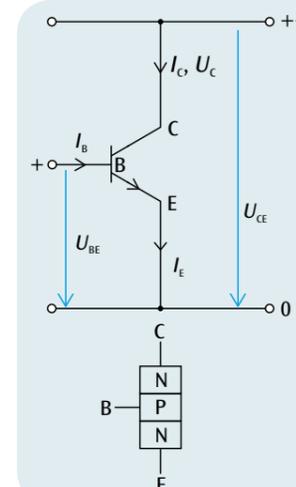


Fig. 1 Structure de principe d'un transistor NPN avec les symboles de commutation et les tensions et courants

**EVALUATION**

La caractéristique d'entrée permet de déterminer la tension seuil  $U_S$ , la caractéristique de commande le facteur de gain

$$B = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

et la caractéristique de sortie les pertes en puissance  $P = U_{CE} \cdot I_C$ .

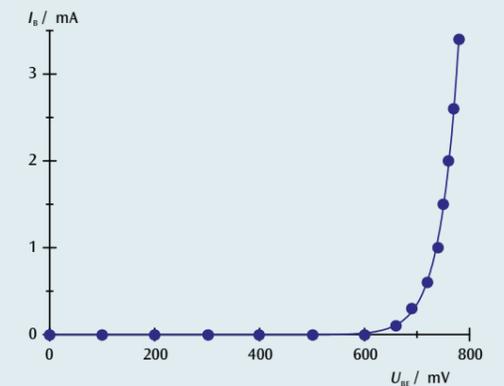


Fig. 2 Caractéristique d'entrée

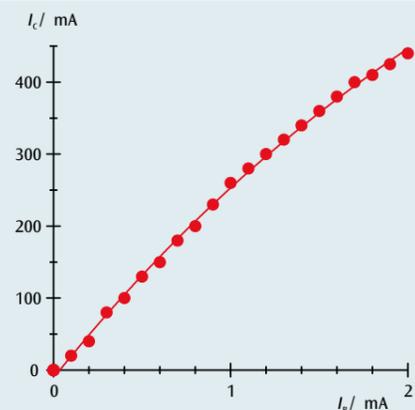


Fig. 3 Caractéristique de commande pour  $U_{CE} = 5,2$  V

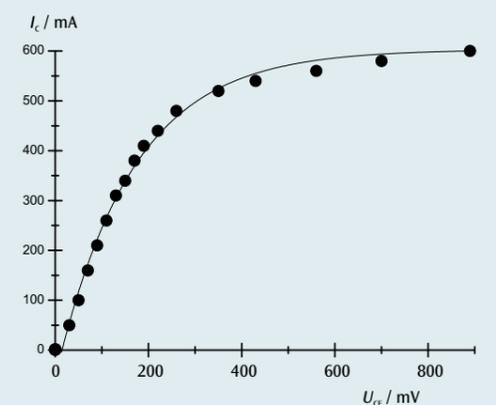
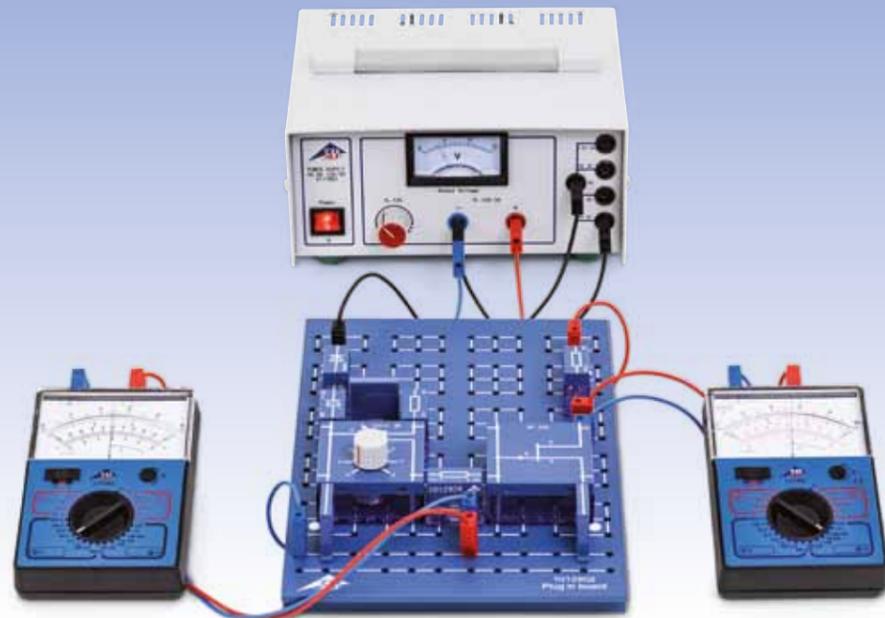


Fig. 4 Caractéristique de sortie pour  $I_B = 4,2$  mA



## EXERCICES

- Mesurer la tension de drain en fonction du courant de drain pour différentes tensions de grille.

## OBJECTIF

Mesurer les caractéristiques d'un transistor à effet de champ

## RESUME

Un transistor à effet de champ (FET) est un composant semi-conducteur dans lequel le courant électrique traversant un canal est commandé par un champ électrique perpendiculaire au flux électrique. Le FET possède trois broches : la Source, le Drain et la Grille. Si une tension électrique est appliquée entre la source et le drain, le courant de drain passe entre eux dans le canal. En présence de faibles tensions drain-source, le FET se comporte comme une résistance ohmique, la caractéristique étant linéaire. Au fur et mesure que la tension drain-source augmente, on observe d'abord un engorgement, puis un désengorgement du canal et la caractéristique passe dans une zone de saturation. Avec des tensions de grille différentes de zéro, la valeur de saturation du courant de drain diminue.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Plaque de connexion des composants                            | 1012902    |
| 1      | Jeu de 10 shunts, P2W19                                       | 1012985    |
| 1      | Résistance 1 kΩ, 2 W, P2W19                                   | 1012916    |
| 1      | Résistance 470 Ω, 2 W, P2W19                                  | 1012914    |
| 1      | Résistance 47 kΩ, 0,5 W, P2W19                                | 1012926    |
| 1      | Condensateur 470 μF, 16 V, P2W19                              | 1012960    |
| 1      | Transistor FET BF 244, P4W50                                  | 1012978    |
| 1      | Diode au silicium 1N 4007, P2W19                              | 1012964    |
| 1      | Potentiomètre 220 Ω, 3 W, P4W50                               | 1012934    |
| 1      | Alimentation CA/CC 0 – 12 V, 3 A (230 V, 50/60 Hz)            | 1002776 ou |
|        | Alimentation CA/CC 0 – 12 V, 3 A (115 V, 50/60 Hz)            | 1002775    |
| 2      | Multimètre analogique AM50                                    | 1003073    |
| 1      | Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 1 mm <sup>2</sup> | 1002840    |

2

## GENERALITES

Un transistor à effet de champ (FET) est un composant semi-conducteur dans lequel le courant électrique traversant un canal est commandé par un champ électrique perpendiculaire au flux électrique.

Le FET possède trois broches : la Source (S), le Drain (D) et la Grille (G). Le canal représente le lien conducteur entre la source et le drain. Si une tension électrique  $U_{DS}$  est appliquée entre la source et le drain, le courant de drain  $I_D$  passe entre eux dans le canal. Le courant est constitué de porteurs de charges d'une polarité (transistor unipolaire), c'est-à-dire d'électrons pour un canal d'un semi-conducteur de type N, de trous pour un canal d'un semi-conducteur de type P. La section ou la conductibilité du canal est commandée par le champ électrique perpendiculaire au flux de courant. Pour générer ce champ transversal, on applique une tension de grille  $U_{GS}$  entre la source et la grille. L'isolation de l'électrode de grille par rapport au canal peut être réalisée par une jonction PN dans le sens bloquant (FET à couche de blocage, J-FET) ou une couche isolante (IG-FET, MIS-FET, MOS-FET). En cas de FET à couche de blocage, la section du canal est commandée par l'extension de la zone de charge spatiale et celle-ci par le champ transversal. Pour garantir que la jonction PN soit toujours dans le sens bloquant, donc qu'aucun courant de grille ne passe, la tension de grille  $U_{GS}$  et la tension drain-source  $U_{DS}$  pour un FET à canal N doivent remplir la condition

$$(1a) \quad U_{GS} \leq 0, U_{DS} \geq 0$$

et pour un FET à canal P la condition

$$(1b) \quad U_{GS} \geq 0, U_{DS} \geq 0$$

En présence de faibles tensions drain-source  $|U_{DS}|$ , le FET se comporte comme une résistance ohmique, la caractéristique étant linéaire. Au fur et à mesure que les valeurs  $|U_{DS}|$  augmentent, on observe des engorgements du canal, car la tension de blocage entre la grille et le canal augmente dans le sens du drain. À proximité du drain, la zone de charge spatiale est plus large qu'à proximité de la source. Par conséquent, le canal à proximité du drain est plus étroit qu'à proximité de la source. À une certaine tension  $U_{DS} = U_p$ , la largeur du canal tend vers zéro. Le canal s'engorge et le courant de drain n'augmente plus lorsque la tension drain-source continue à monter. La caractéristique passe de la zone ohmique à la zone de saturation.

L'extension de la zone de charge spatiale et ainsi la largeur de canal peuvent être contrôlées par la tension de grille. Si la tension de grille n'est pas nulle, le canal est encore plus engorgé, c'est-à-dire que le courant de drain diminue ainsi que, notamment, le courant de saturation. Indépendamment de la tension drain-source  $U_{DS}$ , le canal est toujours bloqué pour  $|U_{GS}| \geq |U_p|$ .

Dans l'expérience, le courant de drain  $I_D$  est mesuré pour différentes tensions de grille  $U_{GS}$  en fonction de la tension drain-source  $U_{DS}$ .

## EVALUATION

Pour les différentes tensions de grille, les valeurs de mesure sont représentées dans un diagramme  $I_D-U_{DS}$  (Fig. 1) et confirmées par la courbe des caractéristiques qui résulte de la commande du courant de drain par la tension drain-source et la tension de grille.

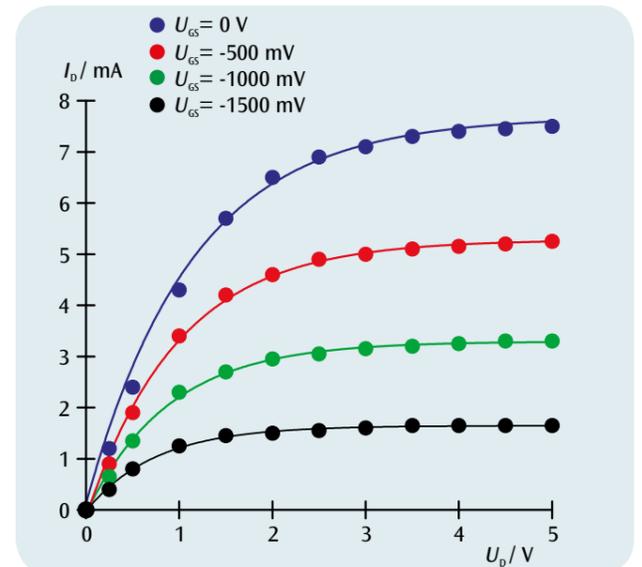
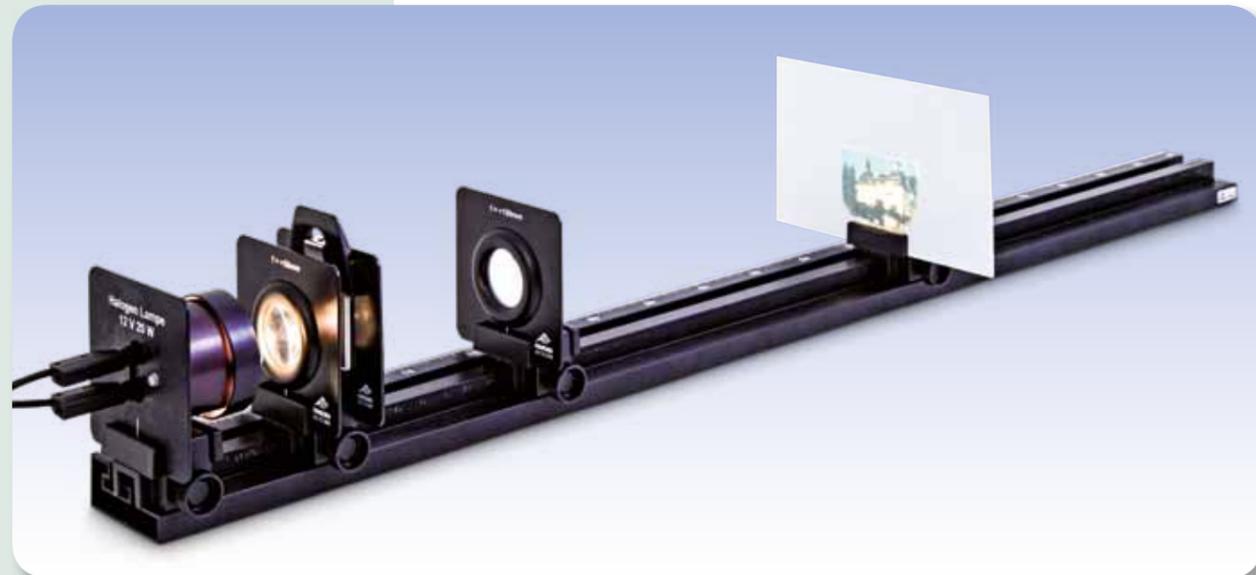


Fig. 1 Caractéristiques du transistor à effet de champ pour les tensions de grille 0 V (bleue), -0,5 V (rouge), -1 V (verte) et -1,5 V (bleu vert)



## EXERCICES

• Déterminer deux positions d'une lentille mince fournissant une image nette.

• Déterminer la focale d'une lentille mince.

## OBJECTIF

Détermination de la focale d'une lentille selon la méthode de Bessel

## RESUME

Sur un banc optique, les éléments optiques – lentille, source lumineuse, écran et objet – sont disposés de sorte à obtenir une image nette à l'écran. Les rapports géométriques des faisceaux d'une lentille mince permettent d'en déterminer la focale.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                                     | Référence  |
|--------|--|------------|
| 1      | Banc d'optique K, 1000 mm                    | 1009696    |
| 4      | Cavalier optique K                           | 1000862    |
| 1      | Source optique K                             | 1000863    |
| 1      | Transformateur 12 V, 25 VA (230 V, 50/60 Hz) | 1000866 ou |
|        | Transformateur 12 V, 25 VA (115 V, 50/60 Hz) | 1000865    |
| 1      | Lentille convexe K, f = 50 mm                | 1000869    |
| 1      | Lentille convexe K, f = 100 mm               | 1010300    |
| 1      | Porte-diaphragme K                           | 1008518    |
| 1      | Jeu de 4 objets de reproduction              | 1000886    |
| 1      | Écran de projection K, blanc                 | 1000879    |

1

## GENERALITES

La focale  $f$  d'une lentille indique la distance entre le plan principal de la lentille et le foyer (voir Fig. 1). On peut la déterminer selon la méthode de Bessel (Frédéric Guillaume Bessel) en mesurant les écarts entre les différents éléments du banc d'optique.

Les figures 1 et 2 montrent que le rapport géométrique suivant doit s'appliquer à une lentille mince :

$$(1) \quad a = b + g$$

$a$  : écart entre l'objet  $G$  et l'image  $B$   
 $b$  : écart entre la lentille et l'image  $B$   
 $g$  : écart entre l'objet  $G$  et la lentille

La résolution de la relation de conjugaison

$$(2) \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g}$$

$f$  : focale de la lentille

donne

$$(3) \quad \frac{1}{f} = \frac{a}{a \cdot g - g^2}$$

ce qui correspond à une équation quadratique avec les deux solutions

$$(4) \quad g_{1,2} = \frac{a}{2} \pm \sqrt{\frac{a^2}{4} - a \cdot f}$$

Pour les deux distances d'objet  $g_1$  et  $g_2$ , on obtient une image nette. Leur différence  $e$  permet de déterminer la focale de la lentille :

$$(5) \quad e = g_1 - g_2 = \sqrt{a^2 - 4af}$$

La différence  $e$  est la distance  $e$  entre les deux positions de lentille  $P_1$  et  $P_2$  qui donnent une image nette.

## EVALUATION

L'équation (4) donne la formule pour la focale d'une lentille mince

$$f = \frac{a^2 - e^2}{4a}$$

selon la méthode de Bessel.

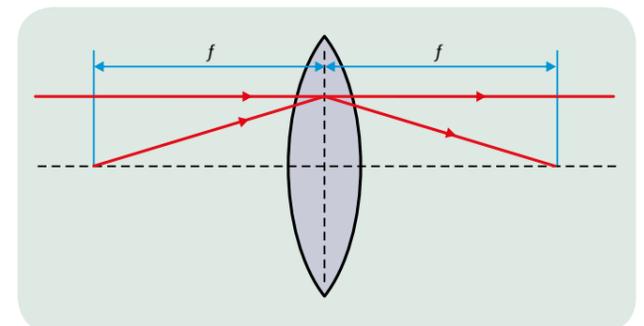


Fig. 1 Représentation schématique permettant de définir la focale d'une lentille mince

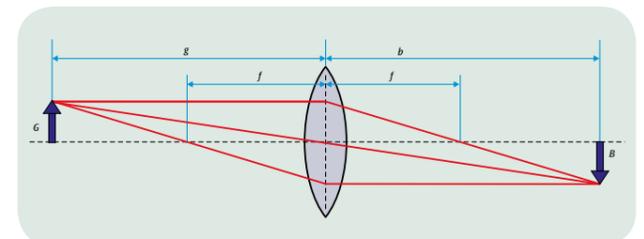


Fig. 2 Représentation schématique du chemin des rayons à travers une lentille.

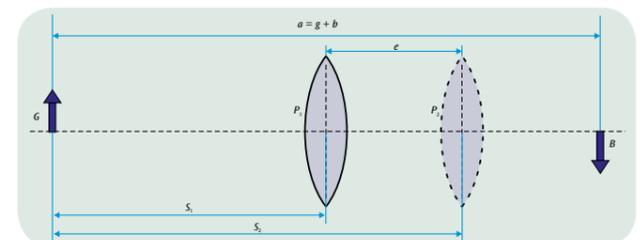
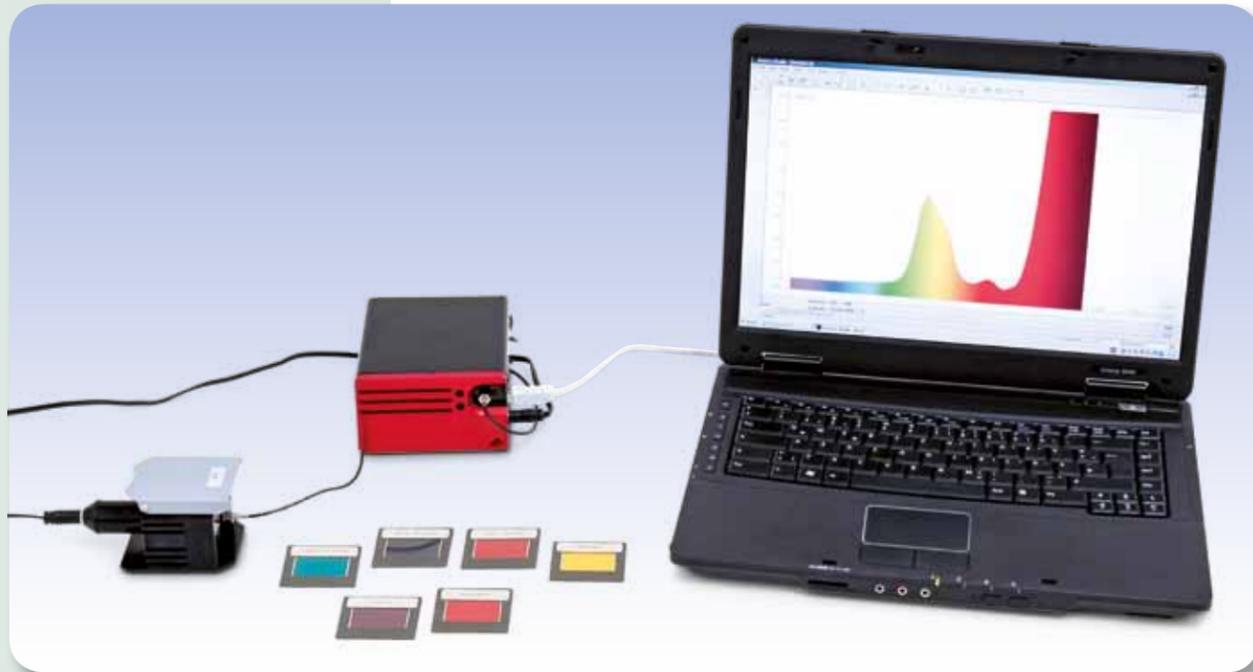


Fig. 3 Agencement schématique des deux positions de lentille qui fournissent une image nette à l'écran



## EXERCICES

- Mesure et comparaison des spectres de transmission de corps rigides.
- Mesure et comparaison des spectres de transmission de liquides.

## OBJECTIF

Enregistrement et Evaluation des spectres de transmission de corps transparents

## RESUME

Pour mesurer les spectres de transmission, on utilise un spectrophotomètre numérique. La lumière transmise absorbée avec une fibre optique est décomposée dans le spectrophotomètre selon le principe de Czerny Turner au moyen d'un réseau de réflexion et représentée sur un détecteur CCD par deux miroirs à réflexion. Le spectre de transmission résulte de la normalisation automatique sur le spectre de la lumière incidente enregistré auparavant.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                        | Référence |
|--------|---------------------------------|-----------|
| 1      | Spectrophotomètre LD, numérique | 1018103   |
| 1      | Module d'absorption             | 1018105   |
| 1      | Lot de 7 filtres de couleur     | 1003084   |
| 1      | Micro cuvettes, 4 ml            | 1018106   |

**En plus recommandé :**

- Chlorophylle
- Permanganate de potassium

1

## GENERALITES

La couleur observée d'un corps illuminé par de la lumière blanche dépend de son pouvoir de réflexion. Si l'on observe le corps dans de la lumière transparente, l'impression de couleur est déterminée par le pouvoir de transmission du corps. Ainsi obtient-on par exemple une impression de couleur rouge si le corps est perméable à la lumière rouge et que les autres couleurs de la lumière sont affaiblies lorsqu'elles traversent le corps. Dans ce cas, la transmission spectrale est maximale pour la lumière rouge.

L'œil humain ne peut pas distinguer clairement si une impression de couleur est produite par de la lumière spectralement pure ou par l'addition des couleurs avoisinantes. Aussi la couleur observée ne permet-elle pas de déduire directement le spectre de transmission. Celui-ci ne peut être défini clairement qu'à l'aide d'un spectrophotomètre.

Au cours de l'expérience, pour enregistrer les spectres de transmission, on utilise le spectrophotomètre numérique. La lumière transmise absorbée avec une fibre optique est décomposée dans le spectrophotomètre selon le principe de Czerny Turner au moyen d'un réseau de réflexion et représentée sur un détecteur CCD par deux miroirs à réflexion. Les spectres de transmission résultent de la normalisation automatique sur le spectre de la lumière incidente enregistré auparavant.

## EVALUATION

En négligeant la réflexion, on peut calculer le pouvoir absorbant  $A(\lambda)$  directement à partir du pouvoir de transmission spectral  $T(\lambda)$  d'un corps. On a l'équation suivante :

$$A(\lambda) = 1 - T(\lambda)$$

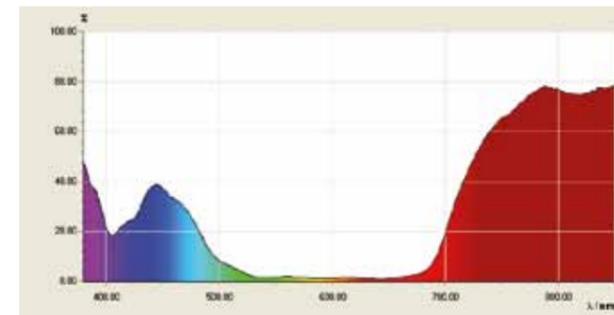


Fig. 1 Spectre de transmission d'un film couleur bleu

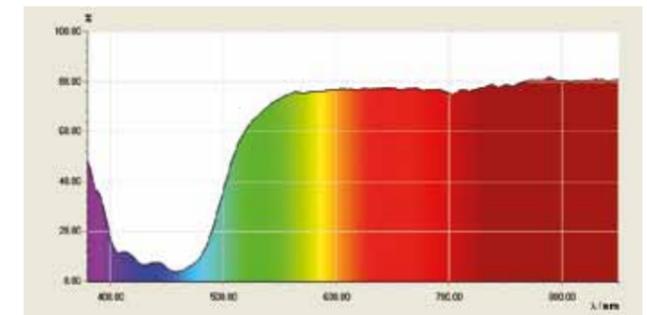


Fig. 2 Spectre de transmission d'un film couleur jaune

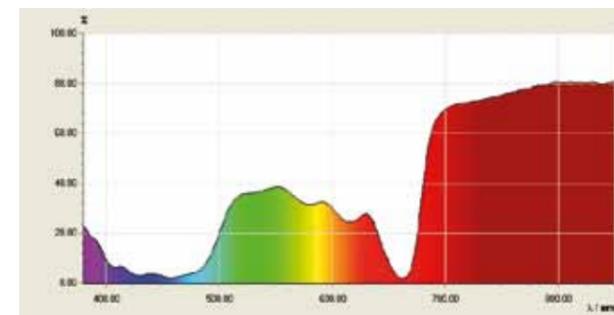


Fig. 3 Spectre de transmission d'une solution de chlorophylle

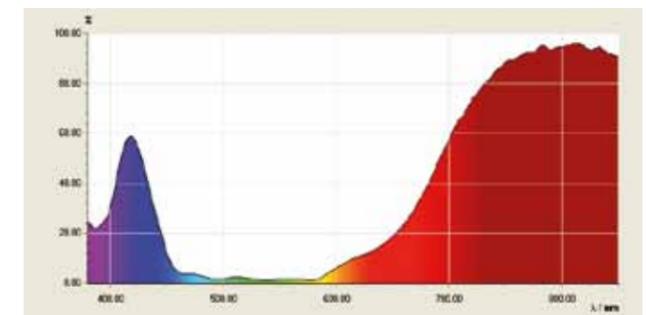
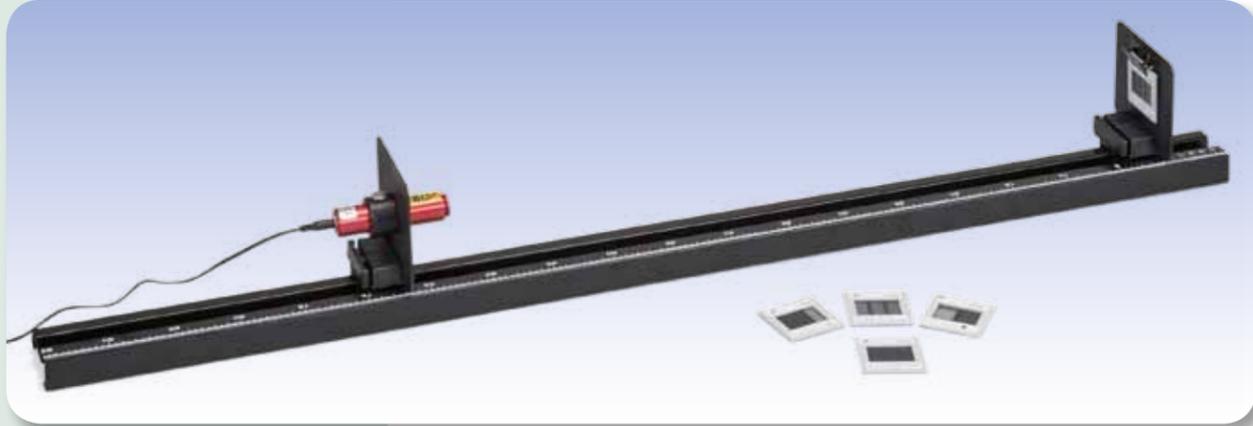


Fig. 4 Spectre de transmission d'une solution de permanganate de potassium



## EXERCICES

- Étude de la diffraction sur des fentes doubles avec différents écarts de fentes.
- Étude de la diffraction sur des fentes doubles avec différentes largeurs de fentes.
- Étude de la diffraction sur des fentes multiples avec différentes quantités de fentes.
- Étude de la diffraction par un réseau à traits et un réseau croisé.

## OBJECTIF

Démonstration de la nature des ondes lumineuses et détermination de la longueur d'onde

## RESUME

La diffraction de la lumière par des fentes multiples et des réseaux peut être décrite par la superposition des ondes élémentaires cohérentes qui, selon le principe de Huygens, partent de chaque point illuminé dans une fente multiple. L'interférence des ondes élémentaires explique le système de bandes claires et sombres que l'on observe derrière la fente multiple. L'écart entre deux fentes et la distance à l'écran d'observation étant connus, l'écart entre deux bandes claires permet de calculer la longueur d'onde de la lumière.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence |
|--------|---|-----------|
| 1      | Diode laser rouge de précision                                  | 1003201   |
| 1      | Banc optique K, 1000 mm   | 1009696   |
| 2      | Cavalier optique K  | 1000862   |
| 1      | Porte-diaphragme K  | 1008518   |
| 1      | Support K pour laser à diode                                    | 1000868   |
| 1      | Diaphragme à 3 fentes doubles de différentes largeurs de fentes | 1000596   |
| 1      | Diaphragme à 4 fentes doubles de différents écarts de fentes    | 1000597   |
| 1      | Diaphragme à 4 fentes multiples et réseaux                      | 1000598   |
| 1      | Diaphragme à 3 réseaux à traits                                 | 1000599   |
| 1      | Diaphragme à 2 réseaux croisés                                  | 1000601   |

## GENERALITES

La diffraction de la lumière par des fentes multiples et des réseaux peut être décrite par la superposition des ondes élémentaires cohérentes qui, selon le principe Huygens, partent de chaque point illuminé dans une fente multiple. Dans certaines directions, la superposition engendre une interférence constructive ou destructive et explique ainsi le système de bandes claires et sombres que l'on observe derrière la fente multiple.

Derrière une fente double, l'intensité est maximale dans un angle d'observation  $\alpha_n$  s'il existe pour chaque onde élémentaire de la première fente très précisément une onde élémentaire de la seconde fente qui

se superpose à elle de façon constructive. C'est le cas lorsque la différence de chemins  $\Delta s_n$  entre les ondes élémentaires partant du centre des fentes représente un multiple entier de la longueur d'onde  $\lambda$  de la lumière (voir fig. 1).

$$(1) \quad \Delta s_n(\alpha_n) = n \cdot \lambda$$

$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  : Ordre de diffraction

Lorsque la distance  $L$  par rapport à la fente double est importante, on obtient l'équation suivante pour de petits angles d'observation  $\alpha_n$  entre la différence de chemins  $\Delta s_n$  et les coordonnées locales  $x_n$  des maxima d'intensité :

$$(2) \quad \frac{\Delta s_n}{d} = \sin \alpha_n \approx \tan \alpha_n = \frac{x_n}{L}$$

$d$ : Écart entre les fentes

Aussi les maxima sont-ils côte à côte espacés de façon régulière :

$$(3) \quad a = x_{n+1} - x_n = \frac{\lambda}{d} \cdot L$$

Ceci s'applique également à la diffraction par une fente multiple avec plus de deux fentes équidistantes. L'équation (1) indique la condition pour une interférence constructive des ondes élémentaires de toutes les  $N$  fentes. Aussi les équations (2) et (3) s'appliquent-elles aussi à la fente multiple. Déterminer les maxima d'intensité exige une démarche mathématique plus importante : tandis que la fente double présente au milieu de deux maxima d'intensité très précisément un minimum, la fente multiple présente un minimum entre les  $n$ -ième et  $(n+1)$ -ième maxima si les ondes élémentaires des  $N$  fentes sont interférées de manière à ce que l'intensité globale soit nulle. C'est le cas lorsque la différence de chemins entre les ondes élémentaires partant des centres des fentes remplit la condition

$$(4) \quad \Delta s = n \cdot \lambda + m \frac{\lambda}{N}$$

$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, m = 1, \dots, N - 1$

On trouve donc  $N-1$  minima et, entre eux,  $N-2$  maxima secondaires, dont l'intensité est inférieure à celle des maxima principaux. Au fur et à mesure qu'augmente la valeur  $N$  de la fente, la valeur des maxima secondaires diminue. On ne parle plus de fente multiple, mais de réseau à traits. Enfin, un réseau croisé peut être considéré comme un agencement de deux réseaux à traits tournés l'un par rapport à l'autre d'un angle de  $90^\circ$ . Sur un réseau rectangulaire, dont la maille est donnée par l'équation (3), les maxima de diffraction deviennent des points. Modulée par la répartition de luminosité issue de la diffraction par la fente simple, la luminosité dans les maxima principaux est d'autant plus concentrée sur de petits angles  $\alpha$  que la largeur de fente  $b$  est importante. Pour obtenir un calcul précis, on ajoute à l'amplitude globale  $A$  les amplitudes de toutes les ondes élémentaires en tenant compte des différences de chemins. A un endroit quelconque  $x$  de l'écran, on a donc

$$(5) \quad I = A^2 \propto \left( \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot b \cdot x}{\lambda \cdot L}\right)}{\frac{\pi \cdot b \cdot x}{\lambda \cdot L}} \right)^2 \cdot \left( \frac{\sin\left(N \cdot \frac{\pi \cdot d \cdot x}{\lambda \cdot L}\right)}{\sin\left(\frac{\pi \cdot d \cdot x}{\lambda \cdot L}\right)} \right)^2$$

## EVALUATION

La longueur d'onde de la lumière diffractée peut être déterminée à partir de la distance  $a$  entre les maxima principaux. On obtient :

$$\lambda = d \cdot \frac{a}{L}$$

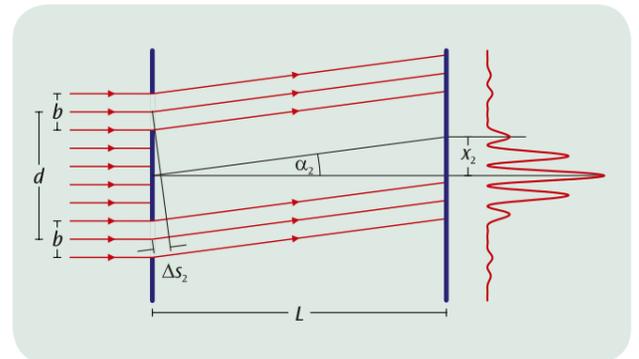


Fig. 1 Représentation schématique de la diffraction de lumière par une fente double

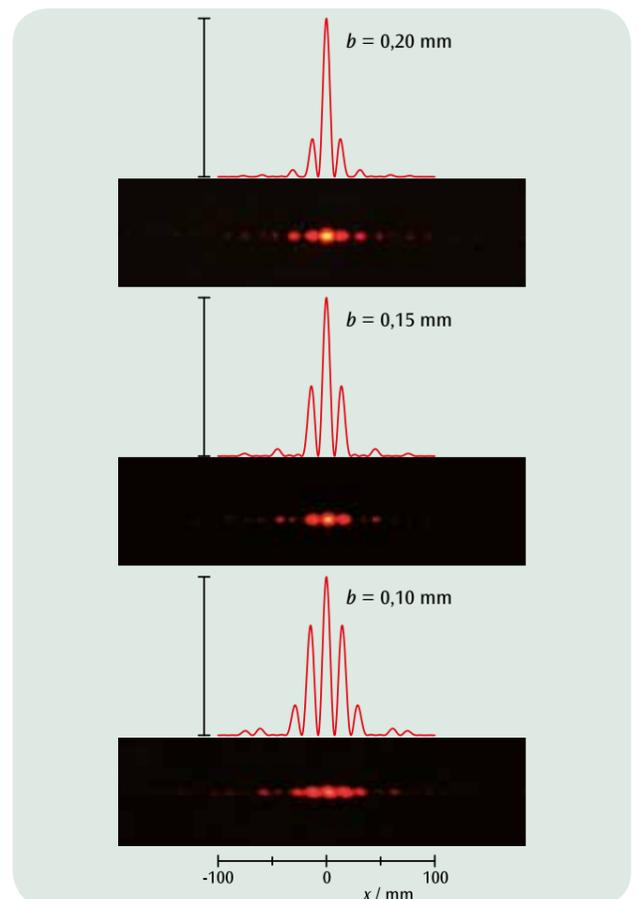
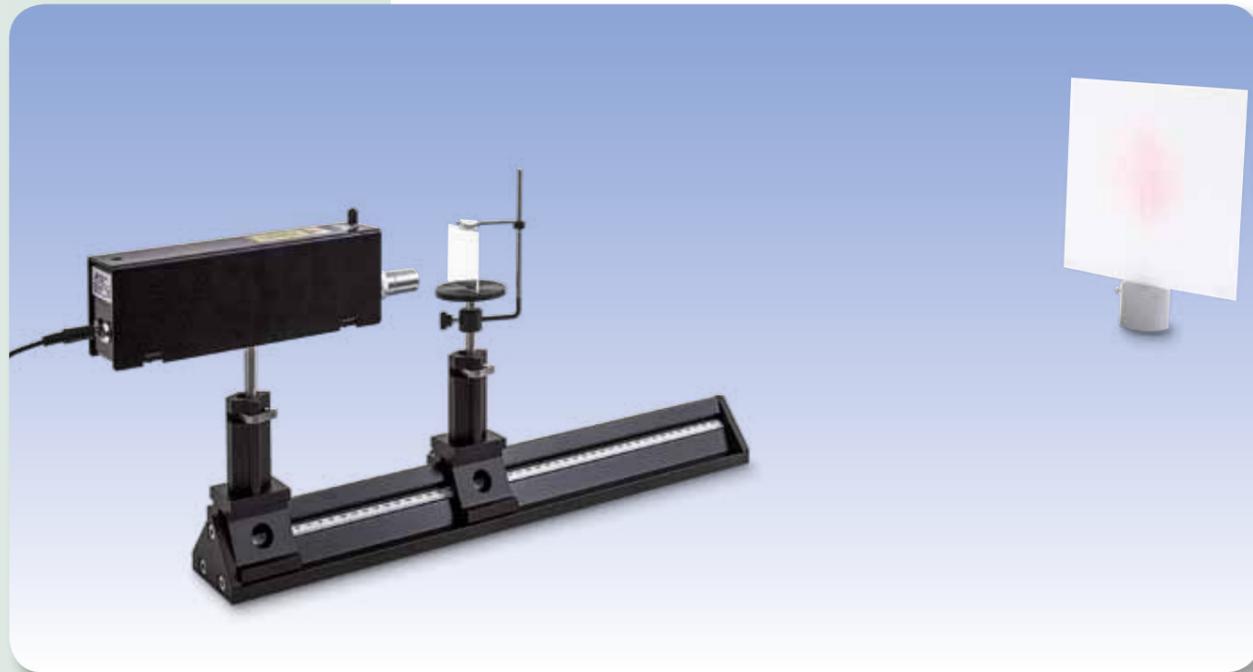


Fig. 2 Intensité calculée et observée de la diffraction sur des fentes doubles avec différents écarts de fentes



## EXERCICES

- Utiliser un biprisme de Fresnel pour générer deux sources lumineuses virtuelles et cohérentes entre elles à partir d'une source lumineuse qui a la forme d'une tache circulaire.
- Observer le champ d'interférence des deux rayons issus des deux sources lumineuses virtuelles.
- Déterminer la longueur d'onde d'un faisceau laser He-Ne d'après la distance séparant les bandes d'interférence.

## OBJECTIF

Générer une interférence entre deux rayons avec un biprisme de Fresnel

## RESUME

Lorsqu'un faisceau lumineux divergent est réfracté à travers un biprisme, cela génère deux faisceaux partiels qui interfèrent l'un avec l'autre en raison de leur cohérence. La longueur d'onde de la lumière utilisée peut être déterminée d'après la distance séparant les sources lumineuses virtuelles et la distance entre deux zones d'interférence.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence |
|--------|---|-----------|
| 1      | Biprisme de Fresnel                             | 1008652   |
| 1      | Table à prismes sur tige                        | 1003019   |
| 1      | Laser Hélium-Néon                               | 1003165   |
| 1      | Objectif achromatique 10x/ 0,25                 | 1005408   |
| 1      | Lentille convergente sur tige $f = 200$ mm      | 1003025   |
| 3      | Cavalier optique D, 90/50                       | 1002635   |
| 1      | Banc d'optique à section triangulaire D, 500 mm | 1002630   |
| 1      | Ecran de projection                             | 1000608   |
| 1      | Socle de serrage, 1000 g                        | 1002834   |
| 1      | Double mètre à ruban de poche                   | 1002603   |

# 2

## GENERALITES

Dans l'une de ses nombreuses expériences sur les interférences lumineuses, Augustin Jean Fresnel s'est servi d'un biprisme pour générer un phénomène d'interférence entre deux rayons lumineux. Il a dispersé un faisceau lumineux divergent par réfraction sur un biprisme en deux faisceaux partiels qui semblent provenir de deux sources lumineuses cohérentes entre elles et qui par conséquent interfèrent l'un avec l'autre. Sur un écran d'observation, il a pu observer une série de pics d'intensité à une distance constante.

L'apparition ou non d'un pic d'intensité dépend du retard optique  $\Delta$  entre les trajets optiques des faisceaux partiels. Lorsque la distance  $L$  séparant la source lumineuse de l'écran d'observation est grande, on pose avec une approximation raisonnable l'équation :

$$(1) \quad \Delta = A \cdot \frac{x}{L}$$

Dans ce cas,  $x$  est la coordonnée du point observé sur l'écran d'observation verticalement à l'axe symétrique et  $A$  est la distance restant à calculer entre les deux images lumineuses virtuelles. Les pics d'intensité apparaissent précisément aux endroits où le retard optique correspond à une valeur multiple de la longueur d'onde  $\lambda$  :

$$(2) \quad \Delta_n = n \cdot \lambda, \text{ avec } n = 0, 1, 2, \dots$$

En comparant (1) et (2), on constate que les pics d'intensité sont situés sur les coordonnées

$$(3) \quad x_n = n \cdot D$$

et qu'ils sont séparés par une distance constante  $D$ . On a par ailleurs la relation suivante :

$$(4) \quad \lambda = A \cdot \frac{D}{L}$$

L'équation (4) peut être utilisée pour déterminer la longueur d'onde  $\lambda$  de la lumière utilisée. Elle est valable pour toutes les figures d'interférence entre deux rayons.

Néanmoins, il reste encore à déterminer comment la distance  $A$  entre les deux sources lumineuses virtuelles peut être mesurée. Pour ce faire, on utilise un montage optique très simple, dans lequel on projette les deux sources lumineuses sur l'écran d'observation à travers une lentille convexe, puis on mesure la distance  $B$  séparant les deux images virtuelles sur l'écran (voir Fig. 2). On a l'expression :

$$(5) \quad A = B \cdot \frac{a}{b}$$

$a$  : distance de l'objet,  $b$  : distance de l'image.

## REMARQUE

Au lieu d'un biprisme, il est possible d'utiliser un miroir de Fresnel (1002649) pour créer les deux sources lumineuses virtuelles. La liste des accessoires correspondante est fournie sous le numéro UE4030320.

## EVALUATION

Dans l'expérience, la source lumineuse est composée d'un laser dont le faisceau est élargi au moyen d'une lentille. La position de la source lumineuse n'est pas exactement connue, et donc la distance de l'objet  $a$  (point objet) non plus. Cette dernière doit par conséquent être calculée selon les lois de l'optique géométrique avec :

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}$$

où on utilise la distance focale  $f$  de la lentille convexe et la distance de l'image  $b$ , celle-ci étant aisément mesurée au cours de l'expérience. On a alors l'équation :

$$A = a \cdot \frac{B}{b} = \frac{f \cdot B}{b - f}$$

Les distances  $D$  et  $L$  sont mesurées immédiatement. Cela signifie que l'on connaît toutes les grandeurs nécessaires pour déterminer la longueur d'onde à l'aide de l'équation (3).

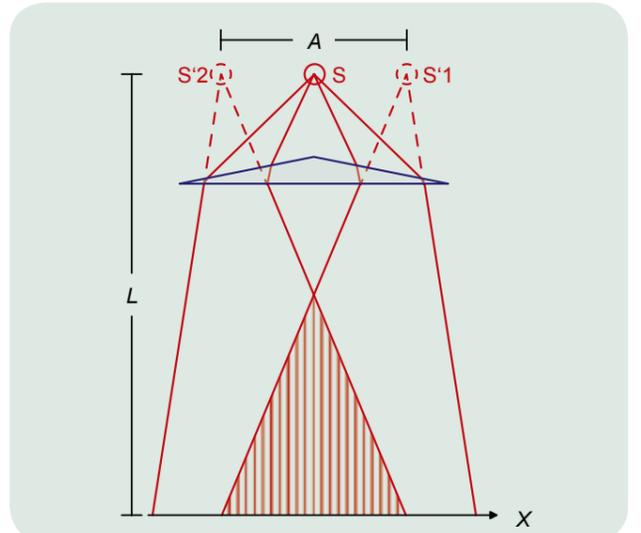


Fig. 1 Représentation schématique du chemin optique du rayon lumineux à travers le biprisme

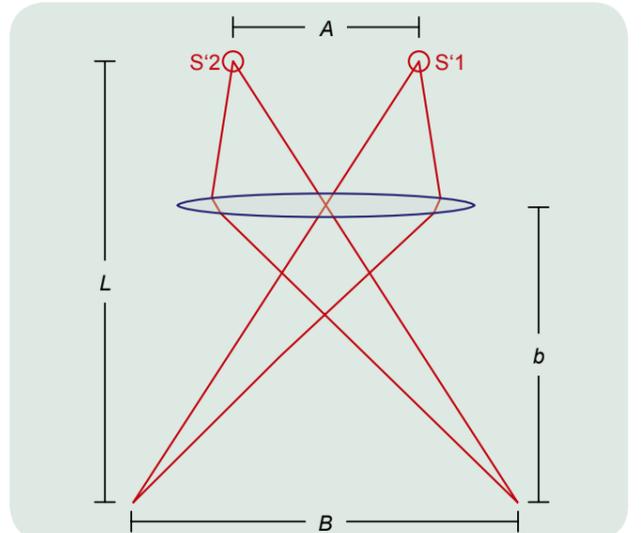
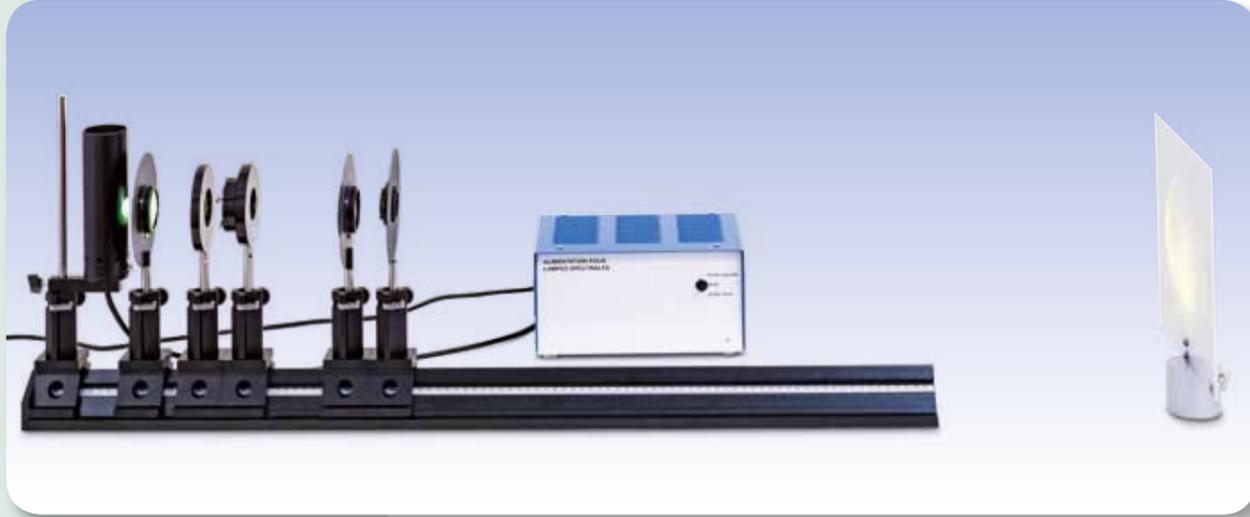


Fig. 2 Chemin du rayon pour la projection des deux images lumineuses virtuelles et synchrones sur l'écran d'observation



## EXERCICES

- Observer les anneaux de Newton en transmission avec un éclairage de lumière monochromatique.
- Mesurer les rayons des anneaux et déterminer le rayon de courbure de l'agencement.
- Estimer l'aplatissement à la compression.

## OBJECTIF

Observer les anneaux de Newton à la lumière monochromatique

## RESUME

Un agencement constitué d'une plaque en verre plane et d'un corps sphérique d'un très grand rayon de courbure est utilisé pour réaliser les anneaux de Newton. La lumière monochromatique tombant perpendiculairement sur cet agencement engendre des anneaux d'interférence concentriques, en alternance clairs et sombres, autour du point de contact des surfaces. Dans l'expérience, on étudie les anneaux de Newton avec de la lumière monochromatique en transmission. Si la longueur d'onde  $\lambda$  de la lumière utilisée est connue, les rayons  $r$  des anneaux d'interférence permettent de déterminer le rayon de courbure  $R$  du corps sphérique.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Banc d'optique à section triangulaire D, 1000 mm      | 1002628    |
| 6      | Cavalier optique D, 90/50                             | 1002635    |
| 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 100                                 | 1003545    |
| 1      | Lentille convergente sur tige $f = 50$ mm             | 1003022    |
| 1      | Lentille convergente sur tige $f = 100$ mm            | 1003023    |
| 1      | Diaphragme à iris sur tige                            | 1003017    |
| 1      | Verres pour anneaux de Newton                         | 1008669    |
| 1      | Porte-composant                                       | 1003203    |
| 1      | Filtre d'interférence 578 nm                          | 1008672    |
| 1      | Filtre d'interférence 546 nm                          | 1008670    |
| 1      | Ecran de projection                                   | 1000608    |
| 1      | Socle de serrage, 1000 g                              | 1002834    |
| 1      | Double mètre à ruban de poche                         | 1002603    |

# 2

## GENERALITES

Même au quotidien, les anneaux de Newton représentent un phénomène résultant de l'interférence de la lumière réfléchie entre deux surfaces pratiquement parallèles aux surfaces limites supérieure et inférieure d'un coin d'air. Avec de la lumière blanche, les interférences sont en couleur, car la condition pour obtenir un maximum d'interférence dépend de la longueur d'onde.

Pour générer des anneaux de Newton, on utilise un agencement constitué d'une plaque en verre de surface plane et d'un corps sphérique d'un très grand rayon de courbure. Le corps sphérique touche le plan de la plaque en verre, engendrant un coin d'air. La lumière monochromatique tombant perpendiculairement sur cet agencement engendre des anneaux d'interférence concentriques, en alternance clairs et sombres, autour du point de contact. Les anneaux sombres résultent d'une interférence destructive, les anneaux clairs d'une interférence constructive. Les ondes de la lumière qui sont réfléchies à la surface limite du corps sphérique interfèrent avec celles qui sont réfléchies à la surface limite de la plaque en verre. Ces anneaux d'interférence peuvent être observés en réflexion et en transmission. En cas de transmission, l'interférence est constructive au centre, indépendamment de la longueur d'onde de la lumière incidente.

Les écarts entre les anneaux d'interférence ne sont pas constants. L'épaisseur  $d$  du coin d'air varie en fonction de l'écart  $r$  avec le point de contact entre le plan en verre et le corps sphérique. La Fig. 1 permet de déduire :

$$(1) \quad R^2 = r^2 + (R-d)^2$$

$R$  : rayon de courbure

Aussi, pour de petites épaisseurs  $d$  et des anneaux d'interférence clairs

$$(2) \quad d = \frac{r^2}{2 \cdot R} = (n-1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

et les rayons des anneaux clairs :

$$(3) \quad r^2 = (n-1) \cdot R \cdot \lambda$$

Notez que le corps sphérique est légèrement comprimé au point de contact. On peut le décrire en approximation en modifiant l'équation (2) avec le rapport

$$(4) \quad d = \frac{r^2}{2 \cdot R} - d_0 \text{ pour } r^2 \geq 2 \cdot R \cdot d_0$$

Ainsi, pour les rayons  $r$  des anneaux d'interférence clairs, on a :

$$(5) \quad r_i^2 = (n-1) \cdot R \cdot \lambda + 2 \cdot R \cdot d_0$$

Dans l'expérience, on étudie les anneaux de Newton en transmission, la lumière d'une lampe à vapeur de mercure étant monochromatisée par l'emploi de filtres d'interférence. Une lentille de projection permet de représenter une interférence très nette sur un écran.

## EVALUATION

Pour déterminer le rayon  $r$ , on calcule la moyenne des rayons mesurés au point d'intersection de gauche et celui de droite, en tenant compte du facteur d'agrandissement par la lentille de projection.

Un diagramme représente  $r^2$  en fonction de  $n-1$ , de sorte que les points de mesure se situent sur des droites de pentes  $a = R \cdot \lambda$  et de segments d'axe  $b = 2 \cdot R \cdot d_0$ .

Comme on connaît les longueurs d'onde, on peut calculer le rayon de courbure  $R$ . Il s'élève à environ 45 m. L'aplatissement  $d_0$  par la compression est nettement inférieur à un micromètre.

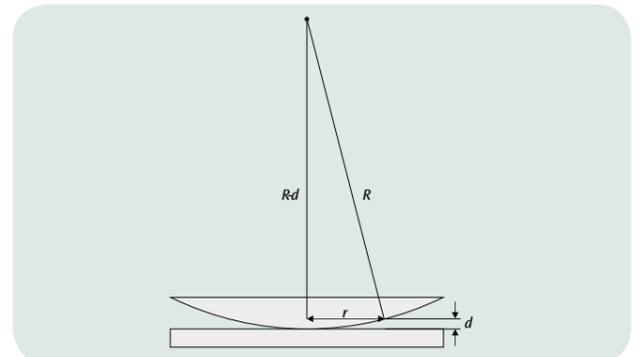


Fig. 1 Représentation schématique du coin d'air entre la lentille convexe et le plan en verre

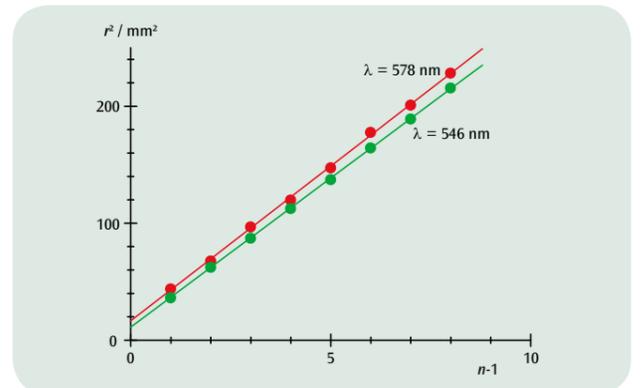


Fig. 2 Rapport entre les rayons  $r^2$  des anneaux d'interférence clairs et le numéro séquentiel  $n$  de ces derniers

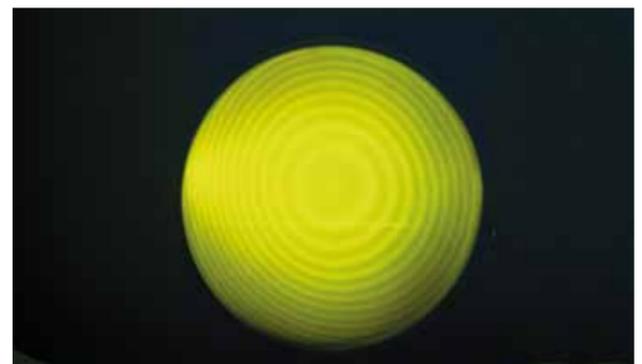
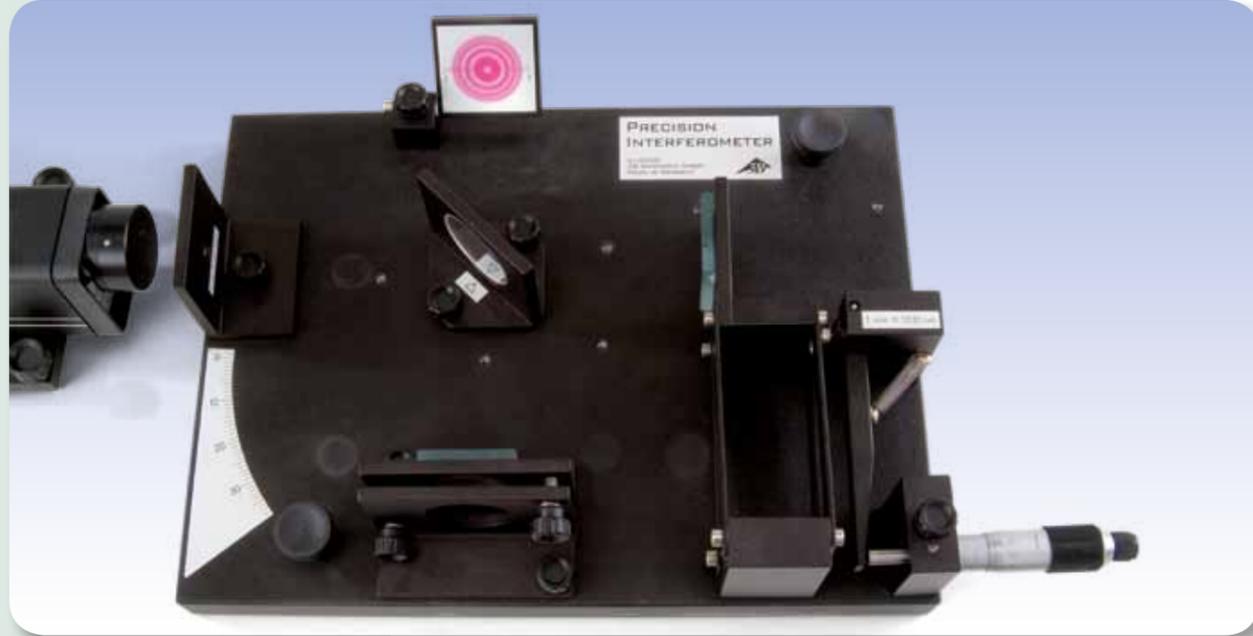


Fig. 3 Anneaux de Newton à la lumière jaune



## EXERCICES

- Détermination de la longueur d'onde de la lumière laser.
- Détermination de l'indice de réfraction de l'air en fonction de la pression d'air.
- Détermination de l'indice de réfraction du verre.
- Appréciation de la qualité superficielle d'un ruban adhésif.

## OBJECTIF

Démonstration et analyse du fonctionnement d'un interféromètre de Michelson

## RESUME

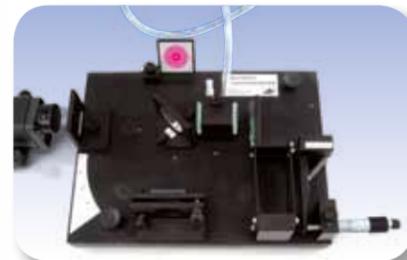
Dans un interféromètre de Michelson, un faisceau lumineux cohérent est divisé par une lame semi-réfléchissante en deux parties qui suivent différents chemins et qui se réfléchissent pour finalement être de nouveau réunies. A l'écran, on observe un modèle d'interférence qui se modifie sensiblement dès que le trajet optique d'un faisceau partiel est modifié d'une fraction de longueur d'onde lumineuse.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                        | Référence |
|--------|---------------------------------|-----------|
| 1      | Interféromètre                  | 1002651   |
| 1      | Complément à l'interféromètre   | 1002652   |
| 1      | Laser Hélium-Néon               | 1003165   |
| 1      | Pompe à vide manuelle           | 1012856   |
| 1      | Tuyau flexible en silicone 6 mm | 1002622   |



Plaque en verre dans la marche du rayon de l'interféromètre de Michelson.



Chambre à vide dans la marche du rayon de l'interféromètre de Michelson.

2

## GENERALITES

Initialement, l'interféromètre de Michelson a été développé par A. A. Michelson pour démontrer le mouvement de la Terre par rapport à l'« éther ». Mais son principe (cf. Fig. 1) est d'une importance capitale, car il peut être utilisé pour des mesures interférométriques, par ex. pour des modifications de longueurs, des épaisseurs de couches ou des indices de réfraction : un faisceau lumineux divergent est divisé par une lame semi-réfléchissante en deux faisceaux partiels qui suivent différents chemins. Ces deux faisceaux partiels sont réfléchis puis de nouveau réunis par superposition sur un écran d'observation. Là, on obtient une image d'interférence qui réagit avec sensibilité aux modifications de la distance optique du trajet, donc du produit résultant de l'indice de réfraction et de la longueur géométrique du trajet, d'un faisceau partiel. Lorsque l'indice de réfraction est maintenu constant, il est alors possible de déterminer les modifications du parcours géométrique, par ex. les modifications de longueur des matériaux par la dilatation thermique de ces derniers. En revanche, lorsque le parcours géométrique est maintenu constant, il sera possible de déterminer les indices de réfraction et leurs modifications par des modifications de pression, de température ou de densité.

Selon que la longueur de trajet optique est augmentée ou réduite, des franges d'interférence apparaissent ou disparaissent au centre de l'image. Il existe un rapport entre la modification  $\Delta s$  de la longueur de trajet optique et la longueur d'onde lumineuse  $\lambda$  :

$$(1) \quad 2 \cdot \Delta s = z \cdot \lambda$$

le nombre entier positif ou négatif  $z$  donnant le nombre de franges d'interférence qui apparaissent ou disparaissent de l'écran.

Si l'on déplace l'une des deux lames dans l'air d'un trajet très précis  $\Delta x$  pour mesurer la longueur d'onde lumineuse, on pourra utiliser comme indice de réfraction  $n = 1$  dans une bonne approximation. La modification du trajet optique est donc :

$$(2) \quad \Delta s = \Delta x$$

La situation est différente si l'on place une chambre sous vide de longueur  $d$  dans un faisceau partiel. Lorsqu'on laisse pénétrer de l'air et augmenter la pression dans la chambre à une valeur  $p$ , le trajet optique est modifié de

$$(3) \quad \Delta s = (n(p) - 1) \cdot d = A \cdot p \cdot d$$

car le rapport entre la pression et l'indice de réfraction de l'air à température constante peut être représenté de la manière suivante :

$$(4) \quad n(p) = 1 + A \cdot p$$

## NOTE

Une plaque en verre est fournie avec le matériel de l'équipement complémentaire. Lorsque cette plaque est placée dans un faisceau partiel, puis tournée lentement dans un angle défini, le trajet lumineux augmente à l'intérieur du verre et diminue à l'extérieur du verre. La modification du trajet optique qui en résulte permet de déterminer l'indice de réfraction du verre. Il est possible en outre de démontrer l'appréciation de la qualité d'une surface à l'exemple d'un ruban adhésif appliqué sur la plaque en verre. Dans la pratique, cette démonstration est réalisée avec un interféromètre de *Twyman-Green*, une variante du modèle de Michelson.

## EVALUATION

Détermination de la longueur d'onde lumineuse : à partir de (1) et (2), on obtient comme équation pour le calcul de la longueur d'onde lumineuse résultant du trajet de déplacement de la lame :

$$\lambda = \frac{2 \cdot \Delta x}{z}$$

Détermination de l'indice de réfraction de l'air. Pour la constante  $A$  introduite dans (4), on obtient l'équation suivante :

$$A = \frac{z \cdot \lambda}{2 \cdot d \cdot p}$$

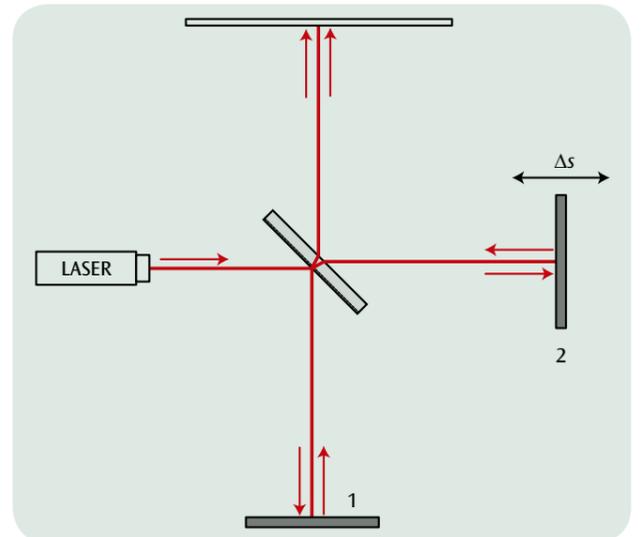


Fig. 1 Trajet du faisceau dans un interféromètre de Michelson à lame mobile

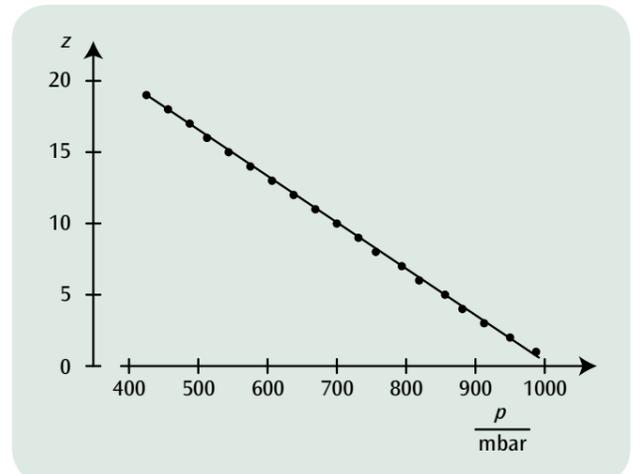
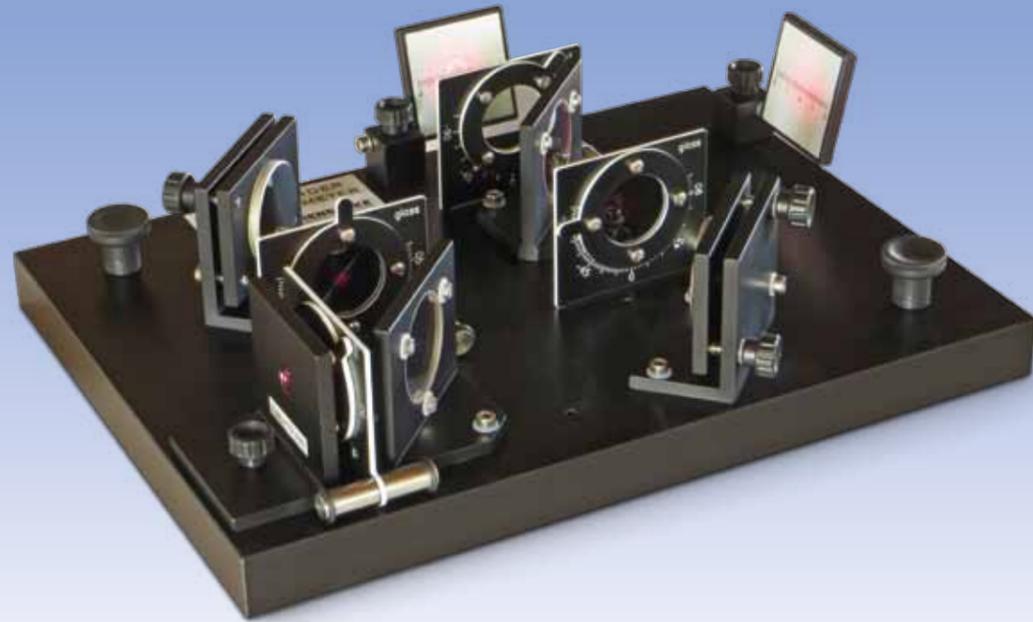


Fig. 2 Nombre de franges interférométriques en fonction de la pression



## EXERCICES

- Montage et réglage d'un interféromètre de Mach-Zehnder
- Observation d'un motif d'interférence pour une information sur le parcours optique impossible, possible et gommée.

## OBJECTIF

Démonstration de la gomme quantique dans le cadre d'une expérience analogique

## RESUME

En mécanique quantique, la lumière est, elle aussi, décrite à l'aide de fonctions d'ondes qui permettent de calculer la répartition spatiale de la densité de probabilités en tant que carré de la fonction d'onde. La lumière convient ainsi à la démonstration de phénomènes de mécanique quantique dans le cadre d'expériences analogiques. Pour effectuer la démonstration de ce que l'on appelle la gomme quantique, on effectue le montage d'un interféromètre de Mach-Zehnder dans le cadre d'une expérience analogique et on observe l'interférence des deux sous-faisceaux sur un écran. Si deux polariseurs se trouvent positionnés à la verticale l'un par rapport à l'autre dans la trajectoire des rayons des sous-faisceaux, l'interférence disparaît, étant donné que du point de vue de la mécanique quantique, une information pourrait être obtenue sur le parcours suivi par le photon. Un troisième polariseur placé directement devant l'écran à un angle de 45° permet de supprimer l'information sur ce parcours et d'observer à nouveau l'interférence.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                       | Référence |
|--------|--------------------------------|-----------|
| 1      | Interféromètre de Mach-Zehnder | 1014617   |
| 1      | Laser Hélium-Néon              | 1003165   |

## GENERALITES

En mécanique quantique, la lumière est, elle aussi, décrite à l'aide de fonctions d'ondes qui permettent de calculer la répartition spatiale de la densité de probabilités en tant que carré de la fonction d'onde. La réunion de deux trajectoires de rayons correspond à la superposition de deux fonctions d'ondes. La densité de probabilités contient alors un terme de mélange qui décrit le motif d'interférence. La lumière convient ainsi à la démonstration de phénomènes de mécanique quantique dans le cadre d'expériences analogiques.

2

Un interféromètre de Mach-Zehnder est utilisé dans le cadre d'une expérience analogique pour effectuer la démonstration de la gomme quantique. Un faisceau laser élargi sert de faisceau de lumière cohérente. A l'aide d'un séparateur de faisceaux BS1, il est divisé en deux sous-faisceaux, un polariseur P garantissant une intensité identique dans les deux faisceaux (cf. fig. 1). Les sous-faisceaux suivent ensuite des parcours différents et finissent par se retrouver à nouveau superposés dans un deuxième séparateur de faisceaux BS2.

Ce faisant, les champs électriques  $E_1$  et  $E_2$  des deux sous-faisceaux s'additionnent – du point de vue de l'ondulation classique – pour donner

$$(1) \quad E = E_1 + E_2$$

et – du point de vue de la mécanique quantique – leurs fonctions d'ondes  $\Psi_1$  und  $\Psi_2$  pour donner

$$(2) \quad \Psi = \Psi_1 + \Psi_2$$

On a donc

$$(3) \quad |E|^2 = |E_1|^2 + |E_2|^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_2$$

ou

$$(4) \quad |\Psi|^2 = |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2 + 2 \cdot \langle \Psi_1 | \Psi_2 \rangle,$$

le terme de mélange en (3) et (4) décrivant respectivement le motif d'interférence qui peut être observé sur un écran. L'équation n°4 décrit le comportement d'un photon individuel. Il interfère avec lui-même aussi longtemps que l'on n'observe pas ou qu'il ne serait pas possible d'observer « quel parcours il suit » à l'aide d'un processus de mesure. Dans ce contexte, on dit que le photon « se comporte comme une onde en l'absence d'une information sur son parcours » et affiche une interférence. En présence d'une information disponible sur son parcours, le photon se « comporte » néanmoins comme une particule classique et aucune interférence n'est possible.

Deux polariseurs supplémentaires P1 et P2 situés dans les sous-faisceaux 1 et 2 influencent le motif d'interférence. Si les polariseurs sont dirigés à la verticale l'un vers l'autre, dans la description classique (3) le produit scalaire ou dans la description fournie par la mécanique quantique (4) le terme d'interférence  $\langle \Psi_1 | \Psi_2 \rangle$  disparaît et avec eux le motif d'interférence. Tel est le cas du point de vue de la mécanique quantique parce que la polarisation permet de constater clairement si le photon suit le parcours 1 ou le parcours 2.

Si on positionne un troisième polariseur A réglé à un angle de 45° derrière le deuxième séparateur de faisceaux, le motif d'interférence réapparaît. Du point de vue de la mécanique quantique, ceci est vérifié parce que le polariseur A « gomme » l'information sur le parcours, c.-à-d. que derrière le polariseur A, il n'est plus possible de décider quel parcours le photon a choisi. Dans l'interprétation classique de l'ondulation de la lumière, le troisième polariseur fait en sorte que les sous-faisceaux polarisés soient affaiblis tout en retrouvant la même polarisation.

## EVALUATION

Sans les deux polariseurs P1 et P2, une information sur le parcours optique n'est pas disponible ; une interférence apparaît.

L'utilisation des deux polariseurs permet d'obtenir une information sur le parcours optique ; il n'y a pas d'interférence.

Le troisième polariseur A gomme l'information sur le parcours optique ; l'interférence réapparaît.

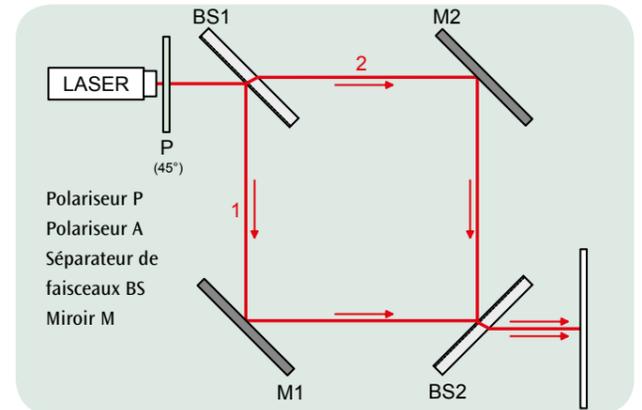


Fig. 1 Trajectoires de rayons dans l'interféromètre de Mach-Zehnder (sans information sur le parcours optique)

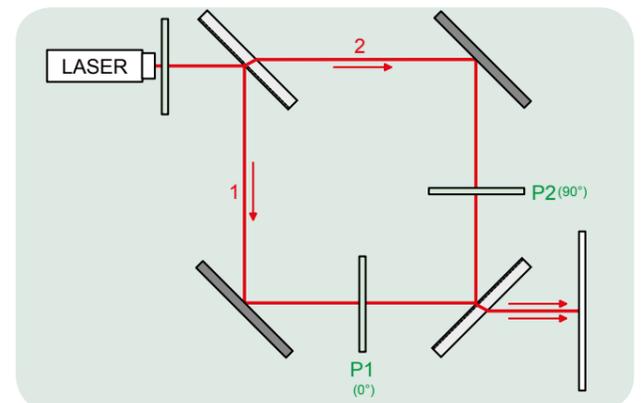


Fig. 2 Trajectoires de rayons dans l'interféromètre de Mach-Zehnder (avec les polariseurs P1 et P2 dans les sous-faisceaux pour obtenir l'information sur le parcours optique)

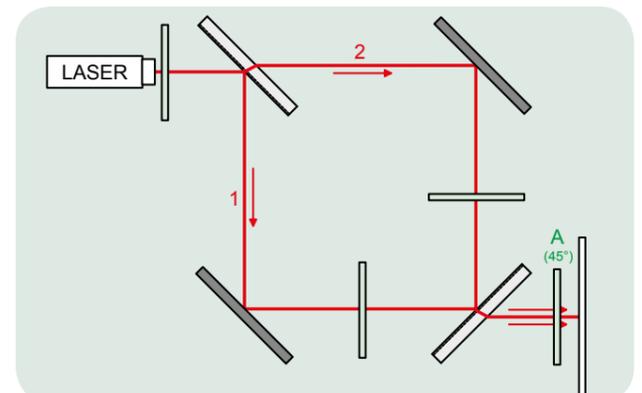


Fig. 3 Trajectoires de rayons dans l'interféromètre de Mach-Zehnder (avec le polariseur A pour supprimer l'information sur le parcours optique)



## EXERCICES

- Mesure de l'intensité lumineuse  $I$  transmise par les filtres de polarisation en fonction de l'angle de rotation des filtres.
- Confirmation de la loi de Malus.

## OBJECTIF

Confirmer la loi de Malus pour la lumière à polarisation linéaire

## RESUME

La loi de Malus décrit l'intensité  $I$  de lumière polarisée, avec l'intensité initiale  $I_0$ , en fonction de l'angle de rotation après le passage à travers un analyseur. L'intensité de lumière est mesurée par un capteur lumineux.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Banc d'optique à section triangulaire D, 500 mm | 1002630    |
| 4      | Cavalier optique D, 90/50                       | 1002635    |
| 1      | Source lumineuse halogène de TP 50W             | 1003188    |
| 1      | Transformateur 12 V, 60 VA (115 V, 50/60 Hz)    | 1006780 ou |
|        | Transformateur 12 V, 60 VA (230 V, 50/60 Hz)    | 1000593    |
| 2      | Filtre de polarisation sur tige                 | 1008668    |
| 1      | Capteur de lumière                              | 1000562    |
| 1      | 3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)                    | 1000540 ou |
|        | 3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)                    | 1000539    |

## GENERALITES

On peut polariser la lumière comme une onde transversale, par exemple en la faisant traverser un filtre de polarisation. Dans une onde lumineuse à polarisation linéaire, le champ électrique  $E$  et le champ magnétique  $B$  oscillent chacun sur un plan fixe. Le sens de l'oscillation du champ électrique est appelé "sens de polarisation".

Dans l'expérience, la lumière rencontre successivement un polariseur et un analyseur, qui sont tournés l'un vers l'autre dans un angle  $\varphi$ . Seule une part de lumière à polarisation linéaire traverse le polariseur. Soit son intensité de champ électrique d'amplitude  $E_0$ .

Dans le sens de polarisation de l'analyseur, la composante oscille avec l'amplitude

$$(1) \quad E = E_0 \cdot \cos \varphi$$

Elle seule peut traverser l'analyseur.

L'intensité de la lumière correspond au carré de l'intensité de champ électrique. Aussi, l'intensité en amont de l'analyseur s'élève à

$$(2) \quad I = I_0 \cdot \cos^2 \varphi,$$

si  $I_0$  est l'intensité en amont du polariseur.

L'équation (2) est connue en tant que loi de Malus. Elle est confirmée dans l'expérience par la mesure de l'intensité avec un capteur lumineux. Dans cette mesure, l'intensité mesurée à  $\varphi = 90^\circ$  correspond à la lumière ambiante. Elle est soustraite de l'intensité mesurée.

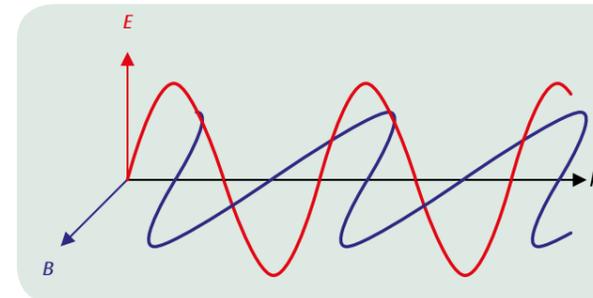


Fig. 1 Représentation pour définir le sens de polarisation

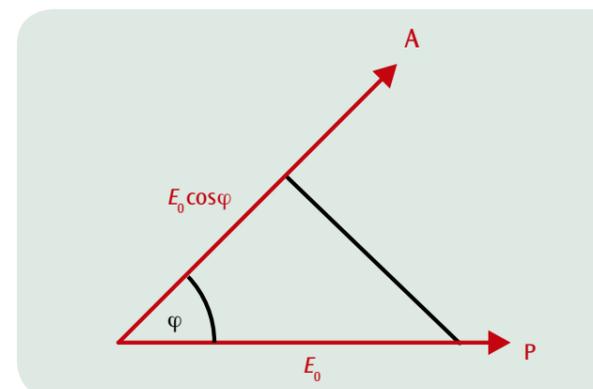


Fig. 2 Représentation pour calculer l'intensité de champ électrique en aval de l'analyseur

## EVALUATION

Après avoir soustrait l'intensité de la lumière ambiante, on représente les valeurs de mesure en fonction de  $\varphi$ . Leur courbe correspond à l'équation (2).

Un autre diagramme représente l'intensité  $I$  comme fonction de  $\cos^2 \varphi$ . Dans ce cas, les valeurs de mesure se situent sur une droite passant par l'origine de pente  $I_0$ .

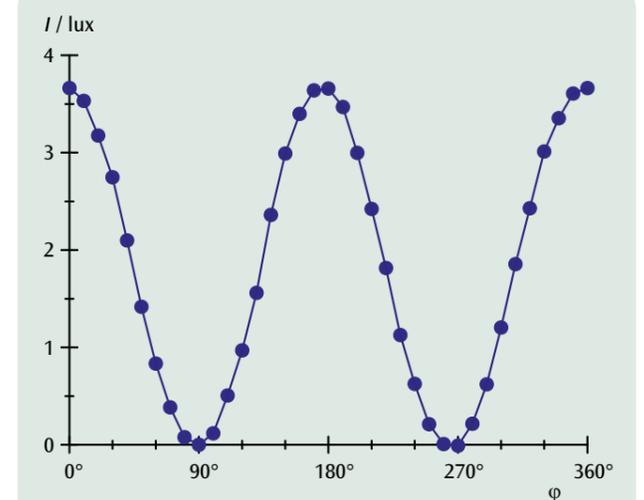


Fig. 3 Intensité lumineuse  $I$  en fonction de l'angle  $\varphi$  entre le polariseur et l'analyseur

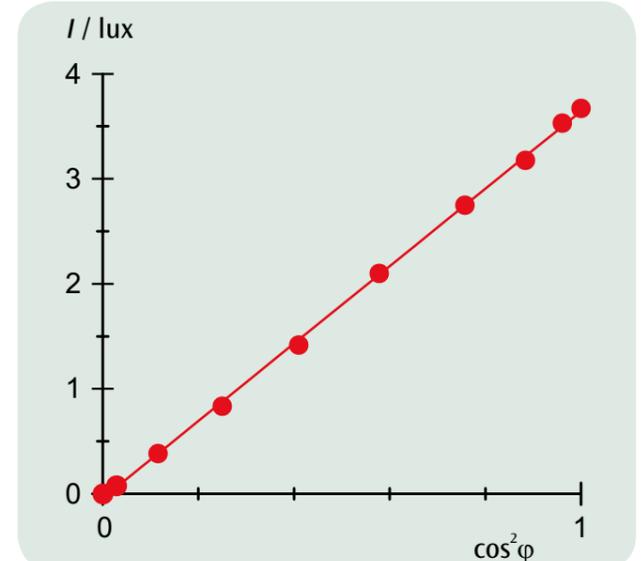


Fig. 4 Intensité lumineuse  $I$  en fonction de  $\cos^2 \varphi$



## EXERCICES

- Mesure de l'angle de rotation en fonction de la longueur d'échantillon.
- Mesure de l'angle de rotation en fonction de la concentration de la masse.
- Détermination de l'angle de rotation spécifique en fonction de la longueur d'onde.
- Comparaison des sens et angles de rotation du fructose, du glucose et du saccharose.
- Mesure de l'angle de rotation pendant l'inversion du saccharose en mélange équimolaire de glucose et de fructose.

## OBJECTIF

Rotation du plan de polarisation par des solutions de sucre

## RESUME

Les solutions de sucre sont optiquement actives, c'est-à-dire qu'elles tournent le plan de polarisation de la lumière continue polarisée linéairement. Le sens de rotation dépend de la nature du sucre, ainsi les solutions de glucose et de saccharose tournent le plan de polarisation à droite et les solutions de fructose à gauche, comme le montre la mesure de l'angle de rotation à l'aide d'un polarimètre. La mesure de l'angle de rotation permet également de suivre le comportement de la solution de saccharose après l'ajout d'acide chlorhydrique. On observe une lente inversion du sens de rotation de la droite vers la gauche, car la structure en double anneau de la molécule de saccharose est décomposée et il se forme un mélange équimolaire de glucose et de fructose. L'angle de rotation du mélange est égal à la somme de l'angle de rotation du glucose tournant à droite et du fructose tournant à gauche.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil   | Référence  |
|--------|--|------------|
| 1      | Polarimètre à 4 LED (230 V, 50/60 Hz)                  | 1001057 ou |
|        | Polarimètre à 4 LED (115 V, 50/60 Hz)                  | 1001056    |
| 1      | Cylindre de mesure, 100 ml                             | 1002870    |
| 1      | Bécher, de 600 mL                                      | 1002872    |
| 1      | Balance électronique Scout Pro 200 g (230 V, 50/60 Hz) | 1009772 ou |
|        | Balance électronique Scout Pro 200 g (115 V, 50/60 Hz) | 1003426    |

## En plus recommandé :

|                   |
|-------------------|
| Fructose, 500 g   |
| Glucose, 500 g    |
| Saccharose, 500 g |

2

## GENERALITES

Par activité optique, on entend la rotation du plan de polarisation de la lumière polarisée linéairement lorsque celle-ci traverse certaines substances. Cette rotation apparaît dans des solutions aux molécules chirales, telles que les solutions de sucre, et dans certains solides, tels que les quartz. Les solutions de glucose et de fructose tournent à droite et les solutions de fructose tournent à gauche.

L'angle  $\alpha$  dans lequel est tourné le plan de polarisation dépend de la substance dissoute et est proportionnelle à la concentration de masse  $c$  et à la longueur  $d$  de l'échantillon.

$$(1) \quad \alpha = [\alpha] \cdot c \cdot d$$

On écrit  $[\alpha]$  étant l'angle de rotation spécifique de la substance. L'angle de rotation spécifique, dans l'équation

$$(2) \quad [\alpha] = \frac{k(T)}{\lambda^2}$$

dépend de la longueur d'onde  $\lambda$  de la lumière et de la température  $T$  de l'échantillon. Dans les tableaux qu'on trouve dans les publications, on le présente généralement pour la lumière de sodium jaune et une température de 25 °C. S'il est connu, la mesure de l'angle de rotation dans un polarimètre permet de déterminer la concentration de la solution.

L'expérience étudie différentes solutions de sucre dans un polarimètre et compare leur angle de rotation. On peut sélectionner la lumière provenant de quatre LED de différentes couleurs. En outre, au cours d'une lente réaction déclenchée par l'ajout d'acide chlorhydrique, une solution de sucre de canne conventionnelle (saccharose) est décomposée en une structure à anneau double et transformée en un mélange équimolaire de glucose et de fructose. Le sens de rotation est alors « inversé » de droite à gauche, car l'angle de rotation qui résulte de la réaction est égal à la somme de l'angle de rotation du glucose tournant à droite et du fructose tournant plus vivement à gauche.

## EVALUATION

Selon l'équation (1), l'angle de rotation d'une substance donnée est proportionnel à la longueur de l'échantillon lorsque la concentration est stable et proportionnel à la concentration lorsque la longueur d'échantillon est stable. La pente des droites passant par l'origine représentées dans la fig. 1 permet de déterminer la rotation spécifique pour les quatre longueurs d'onde du polarimètre.

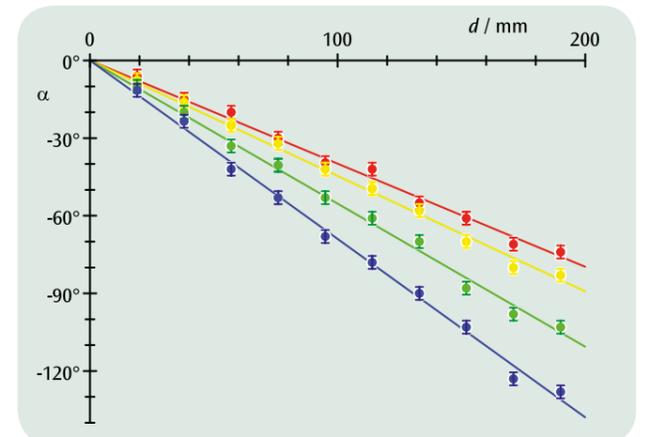
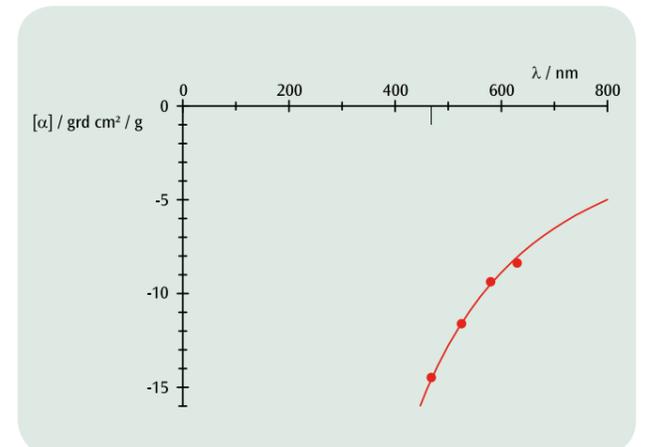
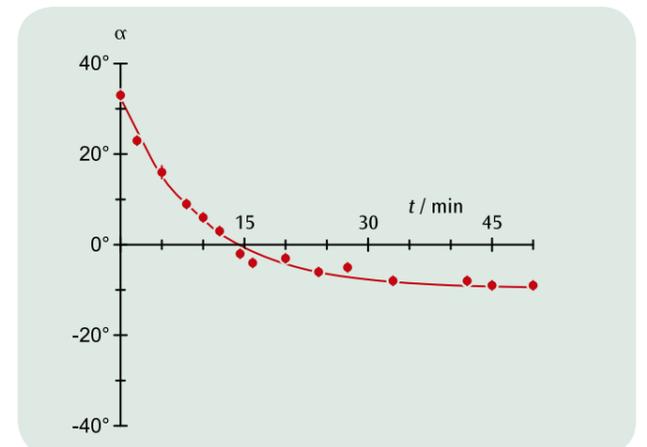

 Fig. 1 Angle de rotation d'une solution de fructose ( $c = 0,5 \text{ g/cm}^3$ ) en fonction de la longueur  $d$  pour quatre longueurs d'onde différentes


Fig. 2 Rapport entre l'angle de rotation spécifique et la longueur d'onde


 Fig. 3 Angle de rotation d'une solution de saccharose ( $c = 0,3 \text{ g/cm}^3$ ,  $d = 190 \text{ mm}$ ) pendant l'inversion en fonction du temps



## EXERCICES

- Démontrer l'effet Faraday dans le verre flint.
- Mesurer l'angle de rotation du plan de polarisation dans le champ magnétique.
- Déterminer la constante de Verdet pour la lumière rouge et verte.
- Déterminer le coefficient de Cauchy  $b$  de l'indice de réfraction.

## OBJECTIF

Démontrer l'effet Faraday et déterminer la constante de Verdet pour le verre flint

## RESUME

Les substances optiquement isotropes, transparentes et non magnétiques deviennent actives optiquement dans un champ magnétique. Elles tournent le plan de polarisation de la lumière polarisée linéairement et traversant la substance dans le sens du champ magnétique, car les temps de déplacement des parties polarisées circulaires gauches et droites sont différents. Cet effet est appelé effet Faraday. Au cours de l'expérience, l'effet Faraday est mesuré dans du verre flint. Ce verre se distingue par une dispersion optique uniforme très élevée. Le rapport de l'indice de réfraction  $n$  avec la fréquence peut être reproduit dans une bonne approximation à l'aide de la formule de Cauchy.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Banc d'optique à section triangulaire D, 1000 mm              | 1002628    |
| 4      | Cavalier optique D, 90/50                                     | 1002635    |
| 1      | Pied optique D  | 1009733    |
| 1      | Diode laser rouge de précision                                | 1003201    |
| 1      | Laser vert 532 nm Classe II                                   | 1003202    |
| 2      | Filtre de polarisation sur tige                               | 1008668    |
| 1      | Ecran de projection   | 1000608    |
| 1      | Noyau de transformateur D                                     | 1000976    |
| 2      | Paire d'épanouissements polaires                              | 1000978    |
| 2      | Bobine D, 900 spires  | 1012859    |
| 1      | Parallélépipède de verre flint pour effet Faraday             | 1012860    |
| 1      | Lot d'accessoires pour effet Faraday                          | 1012861    |
| 1      | Teslamètre E  | 1008537    |
| 1      | Capteur de champs magnétiques à sonde de Hall double          | 1001040    |
| 1      | Socle de serrage, 1000 g                                      | 1002834    |
| 1      | Pince universelle   | 1002833    |
| 1      | Jeu de 15 cordons à reprise arrière, 75 cm, 1 mm <sup>2</sup> | 1002840    |
| 1      | Alimentation CC 1 – 32 V, 0 – 20 A (230 V, 50/60 Hz)          | 1012857 ou |
|        | Alimentation CC 1 – 32 V, 0 – 20 A (115 V, 50/60 Hz)          | 1012858    |

2

## GENERALITES

Les substances optiquement isotropes, transparentes et non magnétique deviennent actives optiquement dans un champ magnétique. Elles tournent le plan de polarisation de la lumière polarisée linéairement et traversant la substance dans le sens du champ magnétique, car les temps de déplacement des parties polarisées circulaires gauches et droites sont différents. Cet effet est appelé effet Faraday.

Les différences de temps s'expliquent dans un modèle simple par la modification de fréquence que subit la lumière polarisée circulaire dans le champ magnétique. En cas de lumière à polarisation droite, la fréquence  $f$  augmente légèrement de la fréquence de Larmor

$$(1) \quad f_L = \frac{e}{4\pi \cdot m_e} \cdot B$$

$$e = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ As} : \text{ charge élémentaire}$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} : \text{ masse au repos de l'électron}$$

La fréquence de la lumière à polarisation gauche diminue de la même valeur. Par conséquent

$$(2) \quad f_{\pm} = f \pm f_L$$

Les différences de fréquence proviennent de différents indices de réfraction dans la matière. C'est pourquoi les vitesses d'onde dans la matière sont différentes.

Ces indications permettent de calculer la rotation du plan de polarisation dans la matière active optiquement :

$$(3) \quad \varphi = 2\pi \cdot f \cdot (t_+ - t_-) = 2\pi \cdot f \cdot \frac{d}{c} \cdot (n(f_+) - n(f_-))$$

$d$  : longueur d'échantillon,

$$c = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} : \text{ vitesse de la lumière}$$

Comme la fréquence de Larmor  $f_L$  est sensiblement inférieure à  $f$ , il en résulte

$$(4) \quad \varphi = 2\pi \cdot f \cdot \frac{d}{c} \cdot \frac{dn}{df} \cdot 2 \cdot f_L$$

$$= f \cdot \frac{dn}{df} \cdot \frac{e}{m_e \cdot c} \cdot B \cdot d$$

L'angle de rotation  $\varphi$  est donc proportionnel au champ magnétique  $B$  et à la distance traversée par la lumière  $d$  :

$$(5) \quad \varphi = V \cdot B \cdot d$$

La constante de proportionnalité

$$(6) \quad V = \frac{e}{m_e \cdot c} \cdot f \cdot \frac{dn}{df}$$

est appelée constante de Verdet et dépend de la dispersion de la lumière dans la matière traversée par la lumière et de la fréquence  $f$  de la lumière. Au cours de l'expérience, l'effet Faraday est mesuré dans du verre flint F2. Ce verre se distingue par une dispersion optique uniforme très élevée. Le rapport de l'indice de réfraction  $n$  avec la fréquence peut être reproduit dans une bonne approximation à l'aide de la formule de Cauchy.

$$(7) \quad n(f) = a + \frac{b}{c^2} \cdot f^2$$

$$\text{avec } a = 1,62, b = 8920 \text{ nm}^2$$

Dans l'expérience, pour augmenter la précision de mesure (car l'angle de rotation est assez faible), on détermine la polarisation de la lumière pour un champ magnétique positif  $B$  de sorte que l'analyseur assombrit le champ de vision précisément à  $0^\circ$ . Après basculement vers le champ magnétique négatif  $-B$ , l'analyseur est tourné dans un angle  $2\varphi$  pour obtenir de nouveau de l'obscurité.

## EVALUATION

À partir de (6) et (7),  $v = \frac{2 \cdot e \cdot b \cdot f^2}{m_e \cdot c^3} = \frac{2 \cdot e \cdot b}{m_e \cdot c \cdot \lambda^2}$   
on obtient

Si la longueur d'onde  $\lambda$  de la lumière utilisée est connue, la constante de Verdet permet de déterminer également le coefficient de Cauchy  $b$  pour l'indice de réfraction du verre flint utilisé.

$$b = \frac{m_e \cdot c}{2 \cdot e} \cdot V \cdot \lambda^2$$

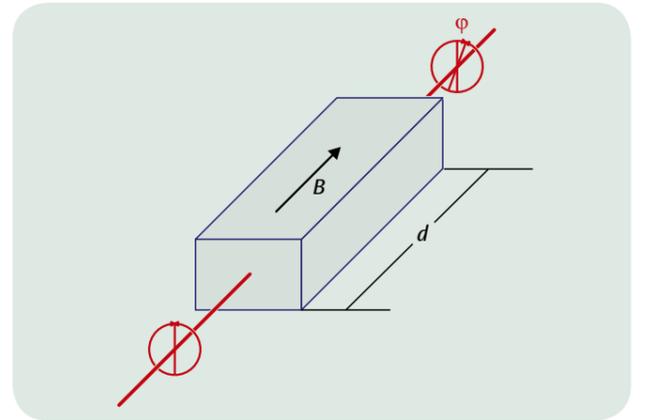


Fig. 1 Représentation schématique expliquant l'effet Faraday

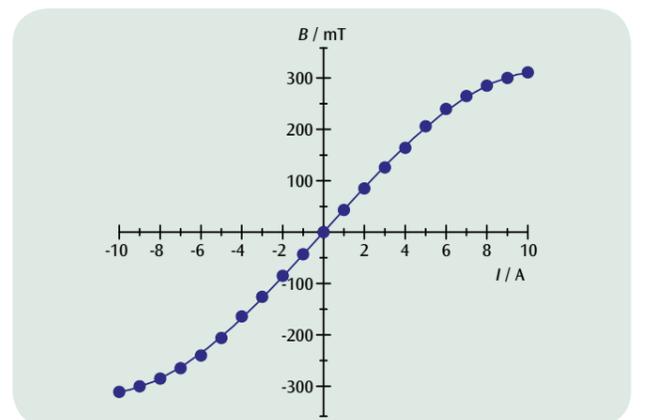


Fig. 2 Courbe de calibration de l'électroaimant

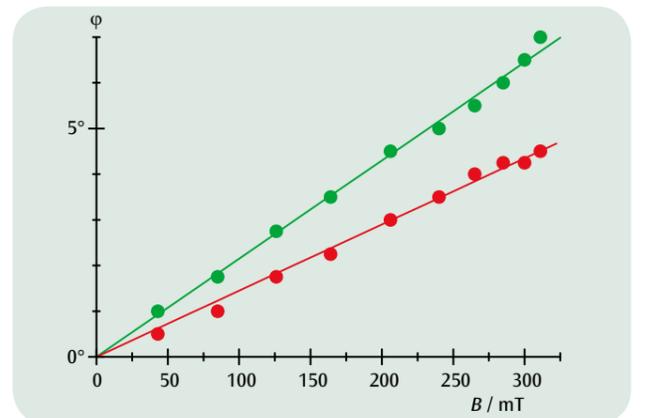


Fig. 3 Angle de rotation en fonction du champ magnétique pour la lumière laser rouge et verte



## EXERCICES

- Compenser le décalage pour tenir compte de la lumière ambiante.
- Mesurer l'intensité de rayonnement relative en fonction de la distance.
- Représenter le résultat dans un diagramme  $S - 1/r^2$ .

## OBJECTIF

Confirmer la loi du carré de la distance pour l'intensité de rayonnement d'une source lumineuse

## RESUME

Selon la loi du carré de la distance, l'intensité de rayonnement d'une source lumineuse, donc la puissance cédée par unité de surface, diminue de manière inversement proportionnelle au carré de la distance avec la source lumineuse. Dans l'expérience, ce rapport est vérifié à l'aide d'une lampe à incandescence qui, pour des distances supérieures aux dimensions du filament, peut être considérée comme une source de rayonnement ponctuelle. Une thermopile d'après Moll permet de mesurer l'intensité relative du rayonnement.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Lampe de Stefan-Boltzmann                           | 1008523    |
| 1      | Thermopile d'après Moll                             | 1000824    |
| 1      | Amplificateur de mesure (115 V, 50/60 Hz)           | 1001022 ou |
|        | Amplificateur de mesure (230 V, 50/60 Hz)           | 1001021    |
| 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    |
| 1      | Multimètre numérique P1035                          | 1002781    |
| 1      | Cordon HF, BNC / douille 4 mm                       | 1002748    |
| 1      | Règle graduée, 1 m                                  | 1000742    |
| 2      | Pied en tonneau, 500 g                              | 1001046    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm                | 1002843    |

1

## GENERALITES

La loi du carré de la distance décrit un rapport fondamental qui s'applique également à l'intensité de rayonnement d'une source lumineuse. Selon cette loi, l'intensité de rayonnement, donc la puissance cédée par unité de surface, diminue de manière inversement proportionnelle au carré de la distance avec la source lumineuse.

La validité de ce rapport sous-entend une source lumineuse rayonnant de manière uniforme dans toutes les directions et dont les dimensions sont négligeables par rapport à la distance considérée. En outre, ni l'absorption ni la réflexion n'ont le droit d'intervenir entre la source et le point de mesure.

Comme la source rayonne de manière uniforme dans toutes les directions, la puissance émise  $P$  est répartie de même sur la surface sphérique en respectant la distance  $r$  avec la source.

$$(1) \quad A = 4\pi \cdot r^2$$

Aussi, l'intensité est donnée par

$$(2) \quad S = \frac{dP}{dA} = \frac{P}{4\pi \cdot r^2}$$

Dans l'expérience, on vérifie l'équation (2) sur une lampe à incandescence. Pour les distances supérieures aux dimensions du filament, on peut considérer la lampe comme une source de rayonnement ponctuelle. Une thermopile d'après Moll permet de mesurer l'intensité relative du rayonnement. À la place de l'intensité absolue  $S$ , on lit la tension thermique  $U_{th}$  comme référence pour l'intensité relative.

## EVALUATION

Au cours des mesures, il est inévitable de saisir également l'intensité de rayonnement de la lumière ambiante. Aussi, avant d'enregistrer la série de mesures, on compense le décalage sur le microvoltmètre. Pour le vérifier, on adapte une droite générale aux points de mesure.

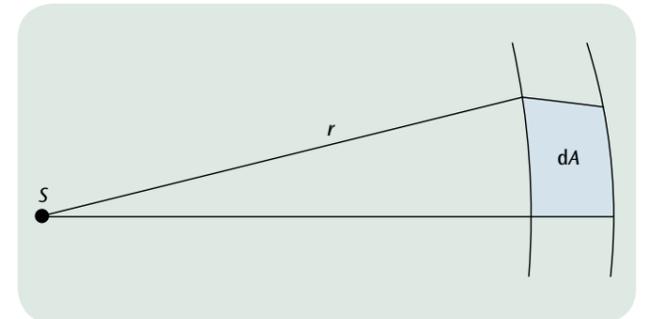
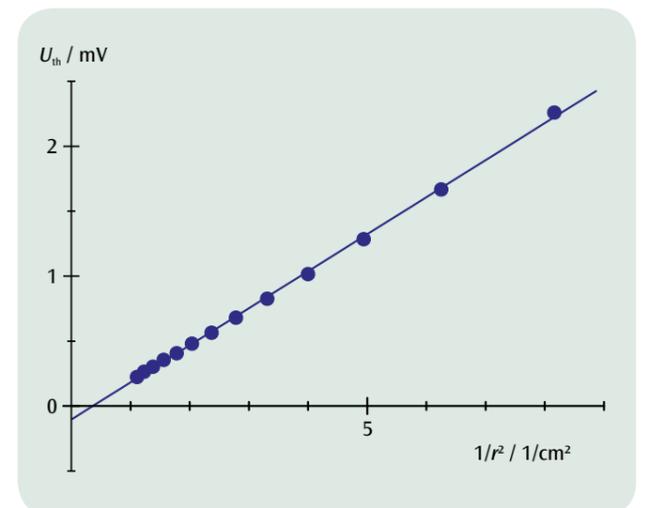


Fig. 1 Carré de la distance


 Fig. 2 Représentation des valeurs de mesure dans un diagramme  $U_{th} - 1/r^2$



## EXERCICES

- Mesurer l'intensité relative du rayonnement d'une lampe à incandescence à filament de tungstène avec une thermopile d'après Moll en fonction de la température.
- Mesurer la résistance dépendante de la température du filament pour déterminer la température.
- Représenter les valeurs de mesure dans un diagramme  $\ln(U_{th}) - \ln(T)$  et déterminer les exposants à partir de la pente de la droite.

## OBJECTIF

Confirmer la dépendance de l'intensité de rayonnement vis-à-vis de  $T^4$

## RESUME

La dépendance de l'intensité de rayonnement d'un corps noir vis-à-vis de la température est décrite par la loi de Stefan-Boltzmann. L'intensité de rayonnement d'une lampe à incandescence au filament de tungstène présente la même dépendance à la température. Dans l'expérience, elle est déterminée avec une thermopile d'après Moll au cours d'une mesure relative. La température du filament peut être déterminée à partir de la résistance dépendant de la température, qui est calculée avec une grande précision au cours d'une mesure à quatre conducteurs.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Lampe de Stefan-Boltzmann                           | 1008523    |
| 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    |
| 1      | Thermopile d'après Moll                             | 1000824    |
| 3      | Multimètre numérique P1035                          | 1002781    |
| 2      | Socle de serrage, 1000 g                            | 1002834    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm                | 1002843    |

# 2

## GENERALITES

L'intensité totale et la répartition spectrale du rayonnement thermique d'un corps dépendent toutes deux de la température et de la nature superficielle de ce dernier. À une certaine longueur d'onde et une certaine température, le corps émet d'autant plus de rayonnement qu'il est en mesure d'absorber le rayonnement. Le corps noir – un corps dont la surface est de nature idéale – absorbe complètement le rayonnement de toutes les longueurs d'onde et, à température donnée, émet ainsi le rayonnement thermique avec une intensité maximale. On s'en sert pour étudier la dépendance du rayonnement thermique vis-à-vis de la température.

La dépendance de l'intensité de rayonnement  $S$  d'un corps noir vis-à-vis de la température est décrite par la loi de Stefan-Boltzmann.

$$(1) \quad S_0 = \sigma \cdot T^4$$

$T$  : température absolue

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} : \text{constante de Stefan-Boltzmann}$$

Cette intensité ne peut pas être mesurée directement, car le corps absorbe en même temps les rayonnements de son environnement. L'intensité mesurée est donc

$$(2) \quad S_s = \sigma \cdot (T^4 - T_0^4)$$

$T_0$  : température ambiante absolue

La lumière émise par une lampe à incandescence est également un rayonnement thermique. Dans ce cas, on choisit la température du filament de manière à ce qu'une partie importante soit émise comme lumière visible. La dépendance de l'intensité totale de rayonnement vis-à-vis de la température correspond à celle du corps noir. Dans ce cas :

$$(3) \quad S = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4)$$

car le filament absorbe une partie  $\varepsilon$  du rayonnement de toutes les longueurs d'onde.

L'expérience utilise une telle lampe à incandescence à filament de tungstène pour étudier la dépendance de l'intensité de rayonnement vis-à-vis de la température. Une thermopile d'après Moll permet de déterminer l'intensité de rayonnement avec une mesure relative. La température du filament peut être déterminée à partir de la résistance dépendante de la température

$$(4) \quad R = R_0 (1 + \alpha \cdot (T - T_0))$$

$R_0$  : résistance à la température ambiante  $T_0$

$$\alpha = 4,4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}} \text{ pour le tungstène}$$

car  $R$  peut être déterminée avec une grande précision grâce à une mesure à quatre conducteurs.

## EVALUATION

L'équation (4) permet de déduire la température  $T$

$$T = \frac{R - R_0}{\alpha \cdot R_0} + T_0$$

Toutefois, l'équation (4) ne s'applique qu'en bonne approximation. Pour des évaluations plus précises, on peut utiliser un tableau figurant dans les instructions d'utilisation de la lampe de Stefan-Boltzmann.

Dans l'expérience, on choisira les températures  $T$  de façon à ce que la température ambiante  $T_0$  puisse être négligée dans l'équation (3). En outre, à la place de l'intensité absolue  $S$ , on lit la tension thermique  $U_{th}$  comme référence pour l'intensité relative. Aussi, l'équation (3) devient

$$U_{th} = a \cdot T^4 \text{ et } \ln(U_{th}) = \ln(a) + 4 \cdot \ln(T)$$

Dans un diagramme  $\ln(U_{th}) - \ln(T)$ , les points de mesure se situent sur une droite de pente 4.

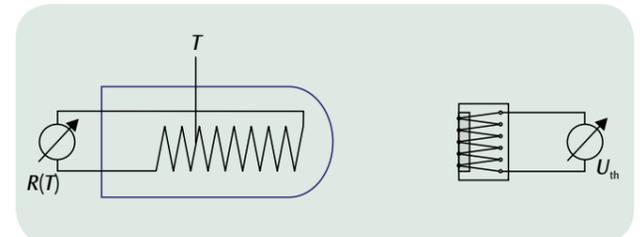


Fig. 1 Représentation schématique du montage

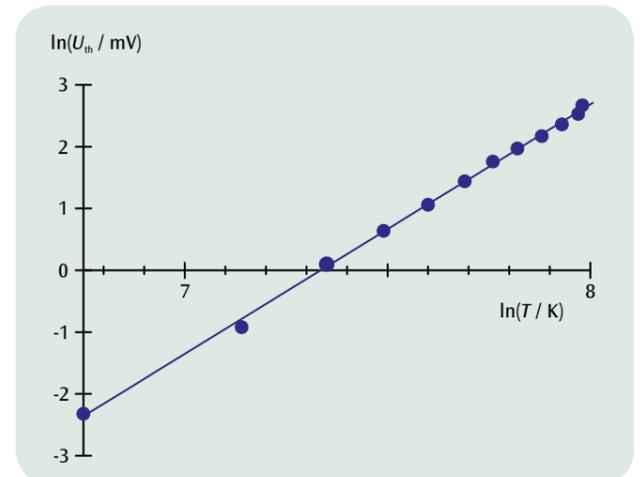


Fig. 2 Diagramme  $\ln(U_{th}) - \ln(T)$



## EXERCICES

- Mesure avec un oscilloscope de la durée de parcours d'une courte impulsion de lumière pour une distance définie par comparaison avec un signal de référence.
- Détermination de la vitesse de la lumière dans l'air en tant que quotient entre la distance et la durée de parcours.

## OBJECTIF

Détermination de la vitesse de la lumière à partir de la durée de parcours d'impulsions lumineuses courtes

## RESUME

La vitesse finie de propagation de la lumière peut être démontrée par une simple mesure de la durée de parcours. Pour cela, des impulsions lumineuses très courtes de quelques nanosecondes seulement seront étudiées et leur durée de parcours déterminée avec un oscilloscope après un trajet aller et retour sur un parcours de mesure de plusieurs mètres. La vitesse de la lumière peut être calculée à partir de la durée de parcours et de la distance entre l'émetteur et le réflecteur à triple prisme.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil   | Référence  |
|--------|--|------------|
| 1      | Appareil de mesure de la vitesse de la lumière (230 V, 50/60 Hz) | 1000882 ou |
|        | Appareil de mesure de la vitesse de la lumière (115 V, 50/60 Hz) | 1000881    |
| 1      | Oscilloscope analogique 2x150 MHz                                | 1002729    |
| 1      | Banc optique U, 600 mm   | 1003040    |
| 2      | Cavalier optique U, 75 mm  | 1003041    |
| 1      | Pied en tonneau  | 1001045    |
| 1      | Tige statif, 1500 mm   | 1002937    |
| 1      | Noix universelle   | 1002830    |
| 1      | Décimètre à ruban de poche, 2 m                                  | 1002603    |

# 1

## GENERALITES

La vitesse finie de propagation de la lumière peut être démontrée avec les techniques de mesure contemporaines par simple mesure de la durée de parcours. Pour cela, des impulsions lumineuses très courtes de quelques nanosecondes seulement seront étudiées et leur durée de parcours déterminée à l'aide d'un oscilloscope après un trajet aller et retour sur un parcours de mesure de plusieurs mètres.

Dans l'expérience, les courtes impulsions lumineuses d'une DEL à impulsions sont dirigées via un séparateur de faisceaux vers deux convertisseurs de photons dont l'amplificateur placé en aval délivre des impulsions de tension pour l'évaluation à l'oscilloscope. Le convertisseur de photons A reçoit les impulsions lumineuses qui sont renvoyées vers l'appareil de mesure par un réflecteur à triple prisme installé à une grande distance. Le convertisseur de photons B mesure l'impulsion de référence non temporisée émise de manière interne. Le déclenchement de l'oscilloscope est assuré par une impulsion de tension émise par la sortie C, puisque elle précède l'impulsion de référence de 60 ns.

La différence des durées de parcours  $t$  des deux impulsions sera mesurée avec un oscilloscope à deux canaux. La vitesse de la lumière peut être calculée à partir de la différence calculée de durée de parcours  $t$  et de la distance  $s$  entre l'émetteur et le réflecteur à triple prisme.

$$(1) \quad c = \frac{2 \cdot s}{t}$$

Il est encore plus impressionnant de varier l'éloignement du réflecteur et d'observer la modification résultante de l'écart d'impulsions sur l'oscilloscope. Ceci est possible sans problème puisque la mise en place du réflecteur à triple prisme n'exige aucun réglage important mais peut être fait de manière approximative.

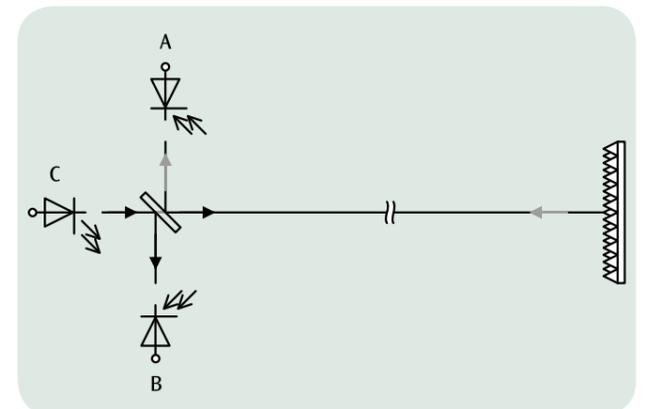


Fig. 1 Principe de mesure

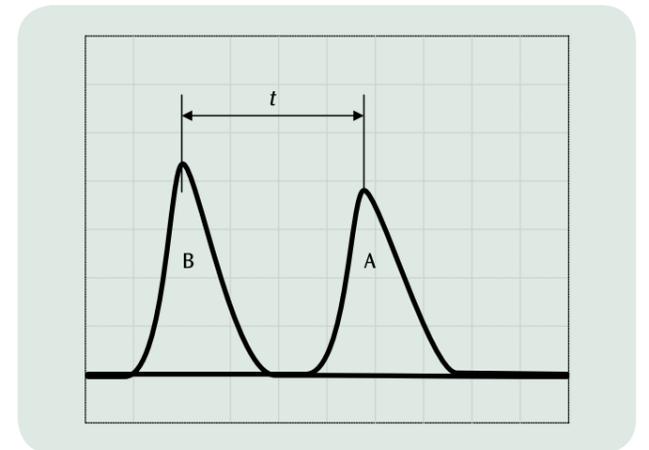
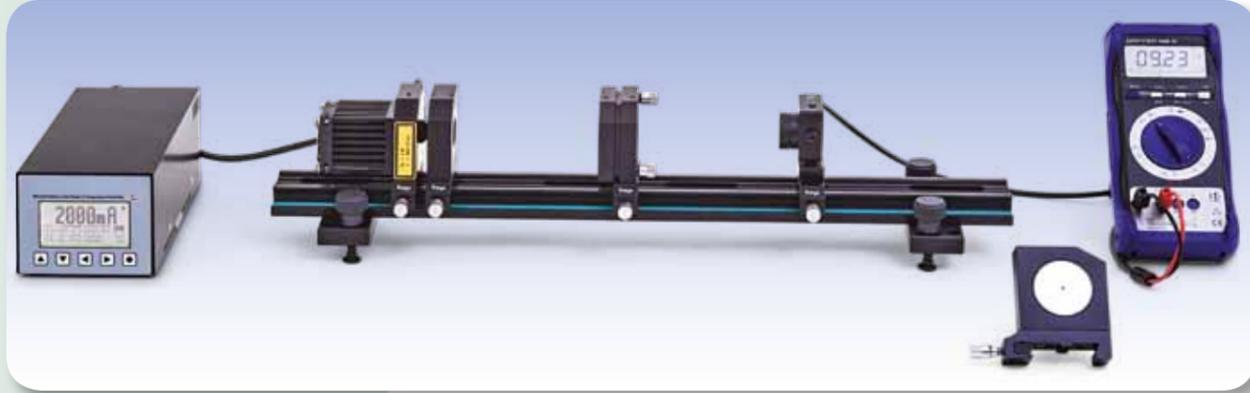


Fig. 2 Mesure de la durée de parcours avec l'oscilloscope



## EXERCICES

- Ajuster la diode laser en vue d'un pompage optique stable du laser Nd:YAG.
- Déterminer le temps de vie du niveau laser supérieur  ${}^4F_{3/2}$  dans le cristal de Nd:YAG.
- Ajuster la cavité résonante et en observer les modes de résonance.
- Mesurer la puissance en sortie du laser Nd:YAG en fonction de la puissance de pompage et définir le seuil laser.
- Observation du « laser spiking » en mode pulsé de la diode laser.

## AVERTISSEMENT

L'expérience est réalisée avec une installation laser de classe IV qui émet des ondes infrarouges (donc dans le spectre invisible à l'œil nu). Le port de lunettes de protection est par conséquent obligatoire. Même avec des lunettes de protection, ne jamais regarder directement le faisceau laser ni mettre ses yeux au même niveau.

# 3

## OBJECTIF

Installation et optimisation d'un laser Nd:YAG

## RESUME

L'expérience décrite ici consiste à installer et à optimiser un laser Nd:YAG pompé par diode. Après l'ajustement de la diode laser pour un pompage optique stable et l'optimisation de la cavité résonante, le système peut être utilisé en tant que laser Nd:YAG. Le laser est étudié en régime stationnaire et non stationnaire. De plus, l'expérience permet de déterminer le temps de vie du niveau laser supérieur  ${}^4F_{3/2}$  dans le cristal de Nd:YAG.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Aparato   | Référence |
|--------|---|-----------|
| 1      | Pilote de diode laser et double contrôleur de température Dsc01-2,5 | 1008632   |
| 1      | Banc optique KL   | 1008642   |
| 1      | Laser à diode 1000 mW   | 1009497   |
| 1      | Cristal Nd:YAG  | 1008635   |
| 1      | Lentille à collimateur $f = +75$ mm                                 | 1008646   |
| 1      | Laser-miroir I  | 1008638   |
| 1      | Diode photoélectrique PIN   | 1008640   |
| 1      | Filtre RG850  | 1008648   |
| 1      | Diode laser d'ajustage  | 1008634   |
| 1      | Coffret de transport KL   | 1008651   |
| 1      | Lunettes de protection pour laser Nd:YAG                            | 1002866   |
| 1      | Multimètre numérique P3340  | 1002785   |
| 1      | Oscilloscope numérique 4x60 MHz                                     | 1008676   |
| 1      | Cordon HF, BNC / douille 4 mm                                       | 1002748   |
| 1      | Cordon HF   | 1002746   |
| 1      | Carte de détecteur infrarouge                                       | 1017879   |

## GENERALITES

Le laser Nd:YAG est un laser solide qui émet une lumière infrarouge. Le milieu amplificateur utilisé est un grenat d'aluminium et d'yttrium dopé Néodyme. Le pompage est effectué par une diode laser à semi-conducteur et les longueurs d'ondes émises sont généralement de l'ordre de 1064 nm. La Fig. 1 livre une vue d'ensemble des niveaux d'énergie du cristal de Nd:YAG avec les principales transitions pour le pompage optique et le fonctionnement du laser. Le pompage optique avec un faisceau lumineux d'une longueur d'onde d'env. 808 nm permet d'exciter des transitions laser de l'état fon-

amental (1) vers le niveau de pompage supérieur (4). Le temps de vie de celles-ci est très court et il génère des transitions rapides, non radiatives, vers le niveau laser supérieur métastable (3). De cette façon, les transitions retour vers l'état fondamental sont évitées. La transition laser s'effectue à  $\lambda = 1064$  nm vers le niveau laser inférieur (2). Celui-ci a un temps de vie très court et se désexcite de façon non radiative pour se retrouver à l'état fondamental. Ainsi, chaque état est peuplé jusqu'à un certain degré. Les états 4 et 2 se désexcitent si rapidement que les densités de population des atomes à ces états peuvent être considérées comme nulles. Par conséquent, pour l'inversion de population  $n$  (= la différence des densités de population des atomes Nd dans les états 2 et 3) et pour le flux de photons  $p$  du champ du faisceau laser, le comportement dynamique du laser peut être décrit par les équations suivantes :

$$(1a) \quad \frac{dn}{dt} = W \cdot (N_{Nd} - n) - \sigma \cdot c \cdot p \cdot n - \frac{n}{\tau_3}$$

$$(1b) \quad \frac{dp}{dt} = \frac{L_{Nd}}{L} \cdot \sigma \cdot c \cdot p \cdot n - \frac{p}{\tau_{res}}$$

$W$  : taux de pompage

$N_{Nd}$  : densité de population des atomes Nd

$\sigma$  : section efficace pour l'émission ou l'absorption d'un photon

$c$  : vitesse de la lumière

$\tau_3$  : temps de vie du niveau laser supérieur 3

$L$  : longueur de la cavité résonante

$L_{Nd}$  : longueur du cristal de Nd:YAG

$\tau_{res}$  : constante de temps des pertes dans la cavité

Dans l'équation (1a), le premier terme décrit le pompage optique, le second l'émission stimulée et le troisième la désexcitation du niveau laser supérieur par émission spontanée. Dans l'équation (1b), le premier terme considère la génération de photons par émission stimulée, le second la réduction du nombre de photons due aux pertes dans la cavité. Pour plus de précision, il convient de considérer le fait qu'en raison de l'émission spontanée, des photons sont présents dès le départ.

Si on néglige les émissions spontanées, on obtient pour le régime stationnaire l'expression suivante :

$$(2) \quad p = \frac{1}{\sigma \cdot c \cdot \tau_3} \cdot \frac{W - W_s}{W_s}$$

$$\text{en considérant que } W_s = \frac{1}{\tau_3} \cdot \frac{n_i}{n_i - N_{Nd}} \quad n_i = \frac{L}{L_{Nd} \cdot \sigma \cdot c \cdot \tau_{res}}$$

Le taux de pompage doit donc dépasser une valeur seuil, après quoi la densité de population des photons croît linéairement avec le taux de pompage. Ni la densité de population de photons, ni le taux de pompage ne peuvent être mesurés directement. L'expérience vise donc à démontrer que la puissance de sortie du laser  $P_L$  au-dessus d'une valeur seuil est proportionnelle à la puissance de pompe.

À la Fig. 2 sont indiquées des solutions aux équations d'évolution en régime non stationnaire. L'inversion de population doit se construire dans un premier temps. Dès que l'inversion de seuil  $n_i$  est atteinte, la densité d'inversion augmente linéairement. Le nombre de photons croît alors rapidement et la densité d'inversion chute à une valeur située légèrement en dessous de l'inversion de seuil. Si on répète cette procédure plusieurs fois, l'état d'oscillation de l'intensité laser diminue progressivement jusqu'à ce que le régime stationnaire s'installe définitivement. Cette intensité laser oscillante en sortie, appelée « laser spiking », est également mise en évidence au cours de l'expérience.

Mais avant cela, on ajuste la longueur d'onde de la diode laser de pompage

sur la transition à  $\lambda = 808$  nm, puis, la diode étant en régime pulsé, on mesure l'évolution temporelle de l'émission spontanée (Fig. 3). Les valeurs obtenues permettent de déterminer le temps de vie du niveau laser supérieur. Lorsque la cavité résonante a été assemblée et ajustée, on observe le phénomène de laser spiking (Fig. 4), puis on mesure la puissance de sortie du laser en fonction de la puissance de pompe.

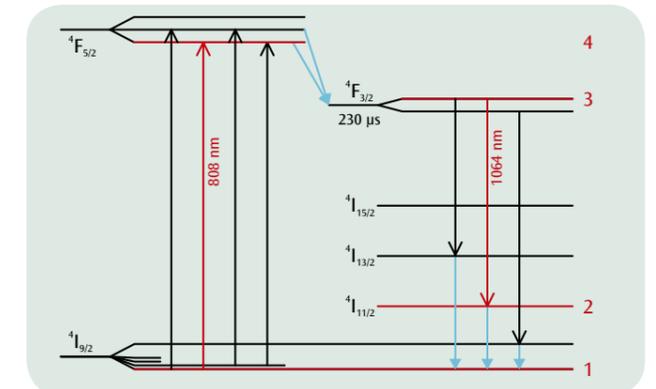


Fig. 1 Schéma des niveaux d'énergie laser du cristal de Nd:YAG. Les transitions qui nous intéressent sont représentées en rouge

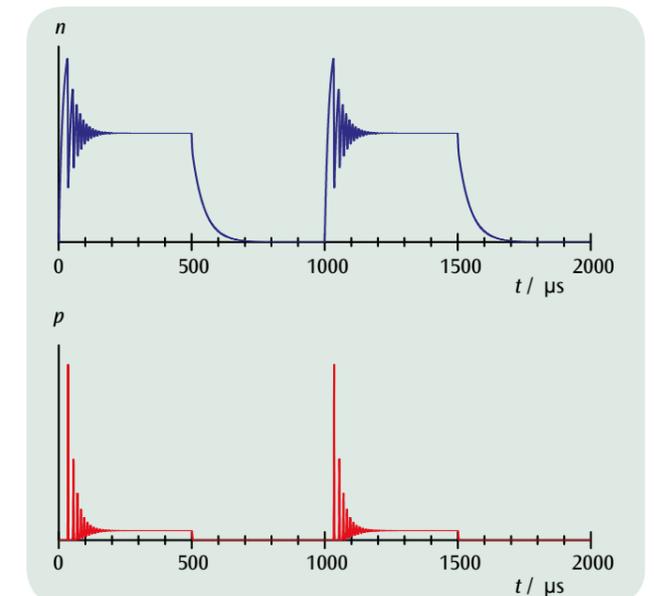


Fig. 2 Solutions non stationnaires des équations d'évolution (laser spiking)

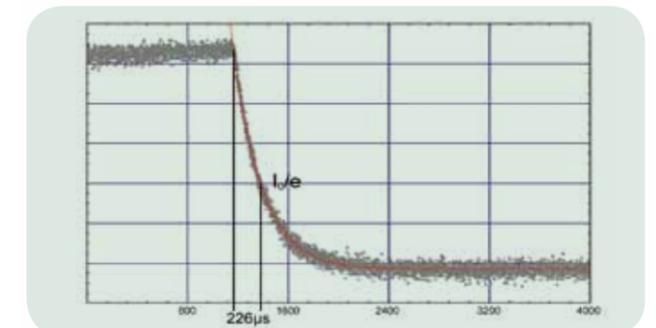


Fig. 3 Enregistrement sur un oscilloscope : le spiking d'un laser Nd:YAG



## EXERCICES

- Installation et optimisation du déclenchement Q-switch d'un laser Nd:YAG au moyen d'un cristal de Cr:YAG.
- Enregistrement des impulsions et calcul de la durée d'impulsion.

## OBJECTIF

Q-switching circuit pour laser Nd:YAG avec un cristal de Cr:YAG

## RESUME

Le fonctionnement d'un laser en mode Q-switch permet de générer des impulsions brèves et d'énergie intense. Le mode Q-switch est basé sur le contrôle du seuil laser par une augmentation ou un abaissement des pertes dans la cavité résonante. Avec l'aide d'un cristal de Cr:YAG, on réalise un déclenchement passif puis on enregistre l'évolution temporelle des impulsions laser. Connaissant la puissance moyenne et le taux de répétition, on peut calculer l'énergie des impulsions.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence |
|--------|---|-----------|
| 1      | Pilote de diode laser et double contrôleur de température Dsc01-2,5 | 1008632   |
| 1      | Banc optique KL   | 1008642   |
| 1      | Laser à diode 1000 mW   | 1009497   |
| 1      | Cristal Nd:YAG  | 1008635   |
| 1      | Déclencheur passif  | 1008637   |
| 1      | Laser-miroir I  | 1008638   |
| 1      | Diode photoélectrique PIN, rapide                                   | 1008641   |
| 1      | Filtre RG850  | 1008648   |
| 1      | Diode laser d'ajustage  | 1008634   |
| 1      | Coffret de transport KL   | 1008651   |
| 1      | Lunettes de protection pour laser Nd:YAG                            | 1002866   |
| 1      | Multimètre numérique P3340  | 1002785   |
| 1      | Oscilloscope numérique 4x60 MHz                                     | 1008676   |
| 1      | Cordon HF, BNC / douille 4 mm                                       | 1002748   |
| 1      | Cordon HF   | 1002746   |
| 1      | Carte de détecteur infrarouge                                       | 1017879   |

# 3

## AVERTISSEMENT

L'expérience est réalisée avec une installation laser de classe IV qui émet des ondes infrarouges, c.-à-d. dans le spectre invisible à l'œil nu. Par conséquent, le port de lunettes de protection est obligatoire. Même avec des lunettes, il est impératif de ne jamais regarder le faisceau directement ni de mettre ses yeux au niveau de celui-ci.

## GENERALITES

Les lasers à Q-switch génèrent des impulsions laser courtes et intenses, telles que celles utilisées notamment dans l'industrie de transformation des matériaux. La technique du Q-switch est basée sur le contrôle du seuil laser par une augmentation ou un abaissement des pertes dans la cavité résonante. Lorsque les pertes sont élevées, le seuil d'émission n'est plus atteint dans la cavité, il ne se produit pas d'oscillation et l'énergie de pompage est emmagasinée dans le cristal laser (= milieu amplificateur). Lorsqu'on déclenche la cavité résonante en abaissant les pertes, il se produit une inversion de population massive qui provoque une impulsion géante dont l'intensité dépasse de plusieurs ordres de grandeur celle d'un laser en régime continu. La différence avec le « laser spiking » est toutefois qu'en mode déclenché, l'inversion de population est beaucoup plus forte et surpasse la valeur de seuil. On distingue deux types de déclenchements : le déclenchement passif et le déclenchement actif. Pour le déclenchement passif, on utilise des « absorbants » saturables dont la capacité d'absorption est activée par l'éclairement dans la cavité résonante. Les déclencheurs actifs généralement utilisés sont des modulateurs acousto-optiques, électro-optiques ou mécaniques qui contrôlent la transmission en externe.

L'utilisation d'un cristal absorbant pour le déclenchement passif implique nécessairement que son absorption puisse être saturée. Pour cela, sa section efficace d'absorption doit être plus grande que la section efficace d'absorption pour la lumière des atomes à l'état excité, et le temps de vie du niveau de transition excité doit être plus grand que la durée de l'impulsion laser (= temps d'établissement de l'état oscillant dans la cavité) et plus petit que le taux de répétition. Le cristal Cr:YAG satisfait à toutes ces conditions. Afin de décrire le comportement dynamique du laser à déclenchement passif, les équations d'évolution pour l'inversion de population  $n$  (dans le cristal de Nd:YAG) et pour le flux des photons  $p$  (dans le champ du faisceau laser) pouvant être atteints par pompage optique (cf. expérience UE4070310) doivent également tenir compte de la densité de population du cristal de Cr:YAG à l'état fondamental. En raison de l'augmentation extrêmement rapide du flux des photons, le taux de pompage et le taux d'émission spontanée sont négligeables. Sur la base de la définition du seuil de densité d'inversion

$$(1) \quad n_s = \frac{1}{\sigma \cdot c \cdot \tau_{res}}$$

$\tau_{res}$  : constante de temps pour la réduction du nombre de photons due aux pertes dans la cavité

$\sigma$  : section efficace pour l'émission ou l'absorption d'un photon  
 $c$  : vitesse de la lumière,

on obtient pour l'évolution temporelle de l'inversion de population  $n$  et pour le flux des photons  $p$  les équations suivantes :

$$(2a) \quad \frac{dn}{dt} = -\frac{n}{n_s} \cdot \frac{p}{\tau_{res}}$$

et

$$(2b) \quad \frac{dp}{dt} = -\left(\frac{n}{n_s} - 1\right) \cdot \frac{p}{\tau_{res}}$$

Dans une impulsion géante, l'inversion de population est à peu près constante et correspond à l'inversion de départ :

$$(3) \quad n(t) = n_i$$

En reprenant l'équation (2b), on peut exprimer le flux des photons ainsi :

$$(4) \quad p(t) = \exp\left[\left(\frac{n_i}{n_s} - 1\right) \cdot \frac{t}{\tau_{res}}\right]$$

L'inversion de population  $n_i$  dans l'impulsion géante est beaucoup plus élevée que celle au seuil  $n_s$ . Par conséquent, le temps de croissance du nombre de photons est beaucoup plus court que la constante de temps  $\tau_{res}$  pour les pertes dans la cavité.

Une autre étape importante est atteinte lorsque l'inversion de population est redescendue à la valeur seuil. Ensuite, le nombre de photons n'est plus modifié comme c'est décrit à l'équation (2b), c.-à-d. que la production de photons laser s'arrête. En reprenant l'équation (2a), on obtient l'expression :

$$(5) \quad \frac{dn}{dt} = -\frac{p_{max}}{\tau_{res}} \quad \text{où } p(t) = p_{max}$$

Lorsqu'il atteint sa valeur maximale, le flux des photons décroît en même temps que la constante de temps pour les pertes dans la cavité.

Le flux maximal des photons se calcule d'après la formule :

$$(6) \quad p_{max} = n_s \cdot \ln\left(\frac{n_i}{n_s}\right) - (n_i - n_s)$$

Par conséquent, les lasers dont le niveau de transition supérieur a un temps de vie très court, c.-à-d. avec un inversion de population très faible, ne présentent pas d'augmentation significative de leur puissance de sortie en mode pulsé.

Au cours de l'expérience, on procède à l'installation d'un cristal de Cr:YAG modulateur dans la cavité résonante et au réajustement des paramètres du laser. Le signal laser est mesuré par une diode PIN et enregistré sur un oscilloscope.

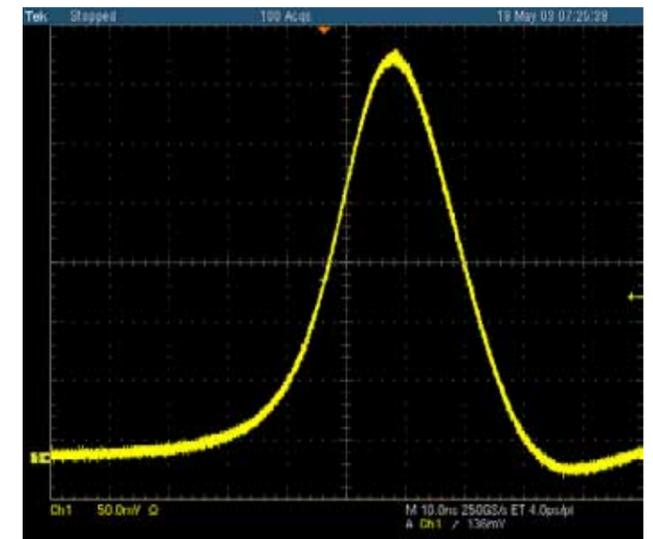
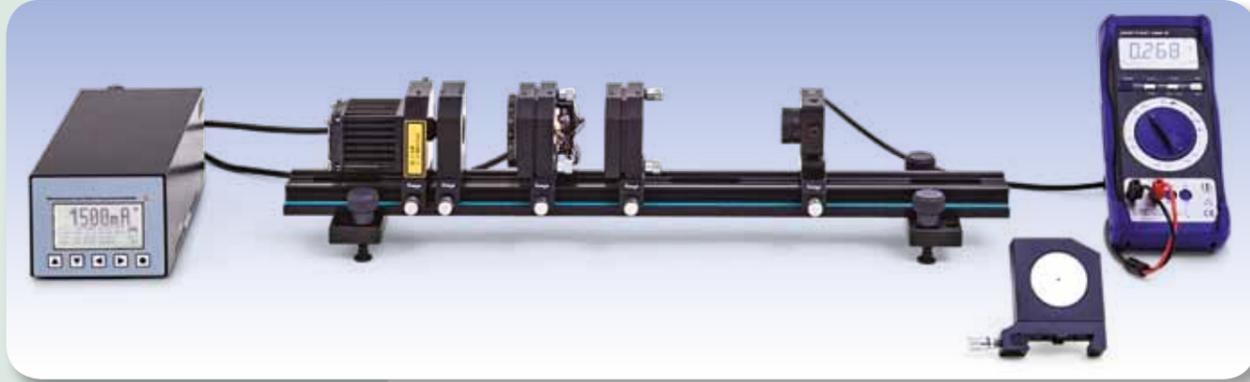


Fig. 1 Évolution temporelle des impulsions d'un laser Nd:YAG à déclenchement passif



## EXERCICES

- Générer des faisceaux laser doublés en fréquence en insérant un cristal de KTP dans la cavité de résonance.
- Mesurer la puissance de sortie du faisceau doublé en fréquence en fonction de l'intensité de l'onde fondamentale.
- Étudier la corrélation existant entre l'orientation du cristal et sa température.

## OBJECTIF

Doublage de fréquence dans la cavité de résonance interne d'un laser Nd:YAG

## RESUME

Lorsqu'ils sont soumis à des champs électromagnétiques puissants, certains matériaux modifient leurs propriétés optiques. Avec ces matériaux, on peut par exemple doubler la fréquence d'une lumière laser de forte intensité. Dans l'expérience, un cristal KTP est utilisé pour générer un faisceau vert d'une longueur d'onde de 532 nm à partir du faisceau infrarouge de 1064 nm d'un laser Nd:YAG doublé en fréquence. Le cristal s'avère être un matériau adéquat pour plusieurs raisons, puisqu'il a un comportement optique fortement non linéaire et qu'il n'absorbe que très peu les radiations émises à la fréquence initiale et à la fréquence doublée.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence |
|--------|---|-----------|
| 1      | Pilote de diode laser et double contrôleur de température Dsc01-2,5 | 1008632   |
| 1      | Banc optique KL   | 1008642   |
| 1      | Laser à diode 1000 mW   | 1009497   |
| 1      | Cristal Nd:YAG  | 1008635   |
| 1      | Module de doublage de fréquence                                     | 1008636   |
| 1      | Laser-miroir II   | 1008639   |
| 1      | Diode photoélectrique PIN   | 1008640   |
| 1      | Filtre BG40   | 1017874   |
| 1      | Diode laser d'ajustage  | 1008634   |
| 1      | Coffret de transport KL   | 1008651   |
| 1      | Lunettes de protection pour laser Nd:YAG                            | 1002866   |
| 1      | Multimètre numérique P3340  | 1002785   |
| 1      | Cordon HF, BNC / douille 4 mm                                       | 1002748   |
| 1      | Carte de détecteur infrarouge                                       | 1017879   |

## AVERTISSEMENT

L'expérience est réalisée avec une installation laser de classe IV qui émet des ondes infrarouges, c.-à-d. dans le spectre invisible à l'œil nu. Par conséquent, le port de lunettes de protection est obligatoire. Même avec des lunettes, il est impératif de ne jamais regarder le faisceau directement ni de mettre ses yeux au niveau de celui-ci.

# 3

## GENERALITES

Lorsqu'ils sont soumis à des champs électromagnétiques puissants, certains matériaux modifient leurs propriétés optiques. Avec ces matériaux, on peut par exemple doubler la fréquence d'une lumière laser de forte intensité. Pour décrire ces phénomènes, on observe la polarisation du matériau qui n'évolue pas de façon linéaire avec l'intensité du champ électrique :

Si le matériau n'est pas magnétique, l'équation de l'onde pour l'intensité du champ électrique  $E$  s'écrit :

$$(1) \quad \Delta E(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 E(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot c^2} \cdot \frac{\partial^2 \tilde{P}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2}$$

$\tilde{P}$  : polarisation du matériau  
 $\epsilon_0$  : constante du champ électrique  
 $c$  : vitesse de la lumière

Entre la polarisation et l'intensité du champ, on a le rapport non linéaire suivant :

$$(2) \quad \tilde{P}(t) = \epsilon_0 \cdot (\chi_1 \cdot E(t) + \chi_2 \cdot E(t)^2)$$

$\chi_1, \chi_2$  : susceptibilités de premier et de second ordre

Par conséquent, un champ électrique oscillant de fréquence  $f$

$$(3) \quad E(t) = E_0 \cdot \exp(i \cdot 2\pi \cdot f \cdot t)$$

génère une polarisation qui comporte deux contributions. La contribution

$$(4) \quad \tilde{P}_1(t) = \epsilon_0 \cdot \chi_1 \cdot E_0 \cdot \exp(i \cdot 2\pi \cdot f \cdot t)$$

oscille à la fréquence simple  $f$  et décrit le changement de la vitesse de la lumière dans le matériau. La contribution

$$(5) \quad \tilde{P}_2(t) = \epsilon_0 \cdot \chi_2 \cdot E_0^2 \cdot \exp(i \cdot 2\pi \cdot 2f \cdot t)$$

vibre à la fréquence doublée  $2f$  et compte tenu de (1) agit comme la source d'un nouveau composant du champ électromagnétique.

En regardant à l'échelle des photons, on observe alors comment deux photons de fréquence  $f$  sont convertis en un photon de fréquence  $2f$  (voir Fig. 1). En raison du maintien des impulsions, le rendement optique est ici particulièrement élevé si le décalage de phase se rapproche de la valeur de zéro.

$$(6) \quad \Delta k \cdot \frac{L}{2} = \left| 2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda_1} - \frac{2\pi}{\lambda_{2f}} \right| \cdot \frac{L}{2} = \frac{2\pi}{c} \cdot f \cdot L \cdot |n_1 - n_{2f}|$$

$L$  : longueur de la cavité résonante

$\lambda_1, \lambda_{2f}$  : longueurs d'ondes dans le matériau à fréquences simple et doublée

Les indices de réfraction  $n_1$  et  $n_{2f}$  du matériau devraient donc concorder le plus possible. Ceci est réalisable avec des matériaux biréfringents à forte anisotropie spatiale et correctement orientés (voir Fig. 2). Par conséquent, le rendement dépend de l'orientation spatiale du matériau doubleur de fréquence.

La densité de puissance  $P_{2f}$  du nouveau faisceau dépend quadratiquement de la densité de puissance  $P_1$  du faisceau fondamental. On a l'équation :

$$(7) \quad P_{2f} = P_1^2 \cdot \frac{L^2}{A} \cdot C \cdot F\left(\Delta k \cdot \frac{L}{2}\right) \text{ où } F(x) = \left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$$

$A$  : section transversale de la cavité résonante,

$C$  : constante du matériau pour une longueur d'onde donnée

Dans l'expérience, on utilise un cristal  $\text{KTiOPO}_4$  ou KTP (potassium, titanyl, phosphate) pour générer un faisceau vert d'une longueur d'onde de 532 nm à partir du faisceau infrarouge de 1064 nm d'un laser Nd:YAG dont la fréquence a été doublée. Le cristal est un matériau adéquat pour plusieurs raisons, puisqu'il a un comportement optique fortement non linéaire et qu'il n'absorbe que très peu les rayons émis à la fréquence initiale et à la fréquence doublée.

## EVALUATION

Afin de confirmer la corrélation de la valeur quadratique de la puissance primaire  $P_1$ , on utilise la corrélation de la puissance primaire du courant d'injection  $I$  de la diode laser qu'on a déterminée dans l'expérience précédente.

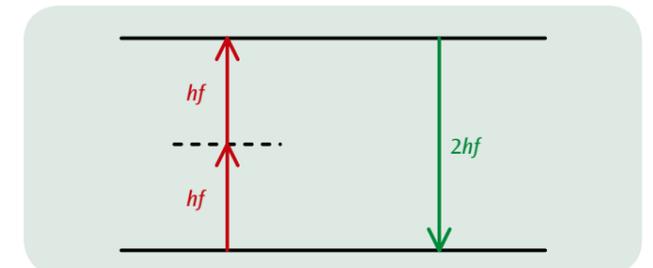


Fig. 1 Représentation schématique du doublement de la fréquence

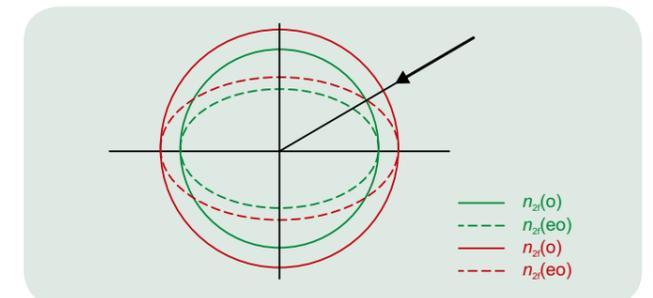


Fig. 2 Vue schématique de la correction de phase au moyen de la double réfraction dans le matériau  
 $n_o$  : Indice de réfraction du faisceau ordinaire  
 $n_{eo}$  : Indice de réfraction du faisceau extraordinaire

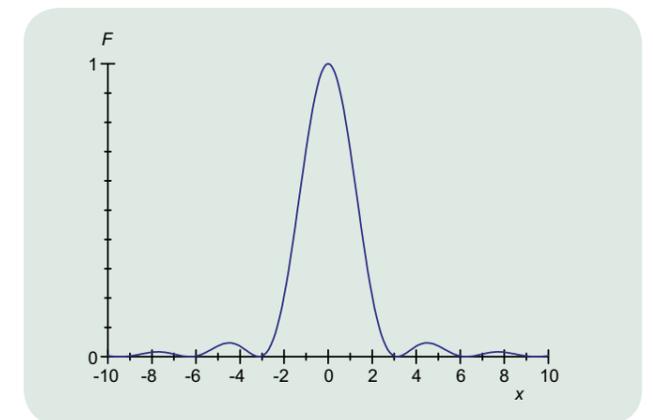


Fig. 3 Caractérisation de la fonction  $F(x)$



## EXERCICES

- Mesure des valeurs limites de la contre-tension en fonction de la longueur d'onde de la lumière.
- Représentation des résultats dans un diagramme énergie/fréquence.
- Détermination de la constante de Planck et du travail de sortie.
- Démonstration de l'absence de rapport entre l'énergie des électrons et l'intensité de la lumière.

## OBJECTIF

Détermination de la constante de Planck selon la méthode de la tension d'arrêt

## RESUME

Dans un arrangement classique modifié, une lumière de fréquence connue passant à travers une anode de forme circulaire arrive sur une cathode et émet des électrons au point d'incidence par le biais de l'effet photoélectrique. L'énergie des électrons peut être définie par l'application d'une tension d'arrêt qui compense à zéro le flux de courant des électrons vers l'anode. Ce faisant, on constate que la valeur limite de ce potentiel d'arrêt correspondant au courant égal à zéro et par conséquent l'énergie des électrons est indépendante de l'intensité de la lumière. La constante de Planck est calculée à l'aide des valeurs limites mesurées à partir des différentes fréquences de lumière.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil   | Référence  |
|--------|--|------------|
| 1      | Appareil pour la constante de Planck (230 V, 50/60 Hz) | 1000537 ou |
|        | Appareil pour la constante de Planck (115 V, 50/60 Hz) | 1000536    |

1

## GENERALITES

L'effet photoélectrique possède deux propriétés majeures découvertes en 1902 par *Lenard*. D'après cette découverte, le nombre des électrons émis par le matériau de la cathode lors de l'effet photoélectrique est proportionnel à l'intensité de la lumière incidente, leur énergie dépend néanmoins de la fréquence et non de l'intensité de la lumière. En 1905, *Einstein* fournit une explication en recourant à des hypothèses fondamentales issues de la description découverte par *Planck* du rayonnement d'un corps noir et créa ainsi des bases importantes pour la théorie quantique.

Einstein supposait que la lumière se propage sous forme de photons dont l'énergie est proportionnelle à la fréquence de la lumière. Si un tel photon possédant l'énergie

$$(1) \quad E = h \cdot f, \\ h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js : constante de Planck}$$

rencontre un électron dans le matériau de cathode, son énergie peut être transmise à l'électron, si bien que celui-ci sort de la cathode avec l'énergie cinétique

$$(2) \quad E_{\text{kin}} = h \cdot f - W$$

Le travail de sortie  $W$  est une grandeur qui dépend du matériau et qui s'élève, pour le césium par exemple, à env. 2 eV. Dans l'expérience, ce rapport est utilisé pour définir la constante de Planck  $h$ . Une lumière d'une fréquence déterminée  $f$  passe au travers d'une anode de forme circulaire et tombe sur la cathode, où elle déclenche l'émission d'électrons. Le courant vers l'anode en résultant est mesuré avec un nanoampèremètre et ramené à zéro par compensation en appliquant une tension d'arrêt  $U_0$  entre l'anode et la cathode. La lumière est prélevée sur des diodes lumineuses de différentes couleurs dont le spectre est suffisamment étroit, de sorte qu'on peut leur affecter une longueur d'onde  $\lambda$  et par conséquent une fréquence

$$(3) \quad f = \frac{c}{\lambda} \\ c = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

L'intensité de la lumière de la diode peut varier de 0 à 100%, si bien qu'il est possible de vérifier que l'énergie des électrons ne dépend pas de l'intensité de la lumière.

## EVALUATION

A la valeur limite  $U_0$  de la tension d'arrêt, le courant est ramené à zéro par compensation. Cette définition peut être RESUMÉE à l'aide des équations (2) et (3) en

$$e \cdot U_0 = h \cdot f - W = h \cdot \frac{c}{\lambda} - W$$

où  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$  : charge élémentaire

La constante de Planck prend donc la forme d'une droite en pente dans un diagramme, dans lequel les valeurs  $E = e \cdot U_0$  sont représentées sur l'axe des y et les valeurs  $f = \frac{c}{\lambda}$  sur l'axe des x.

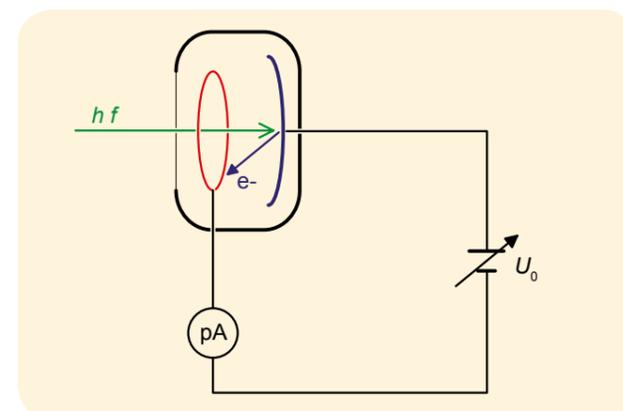


Fig. 1 Schéma du dispositif de mesure

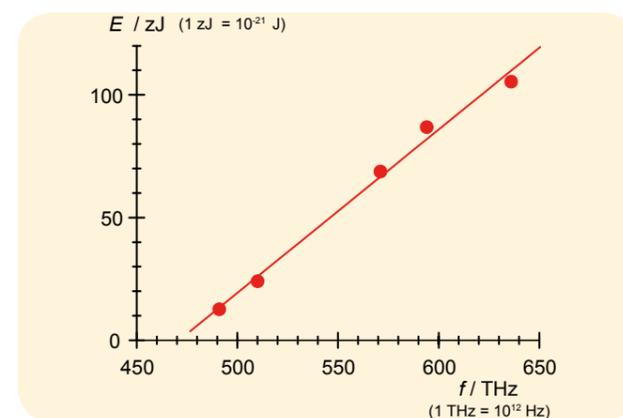


Fig. 2 Diagramme énergie/fréquence

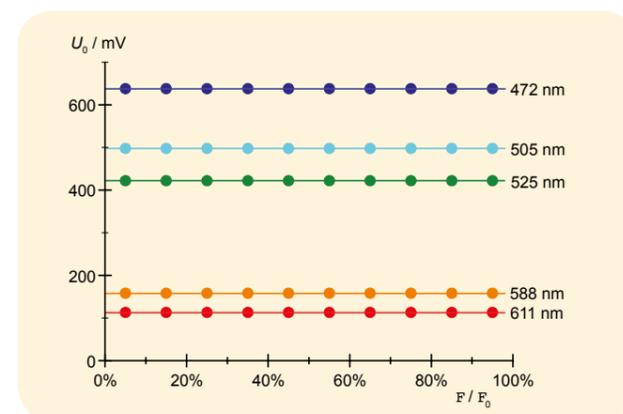
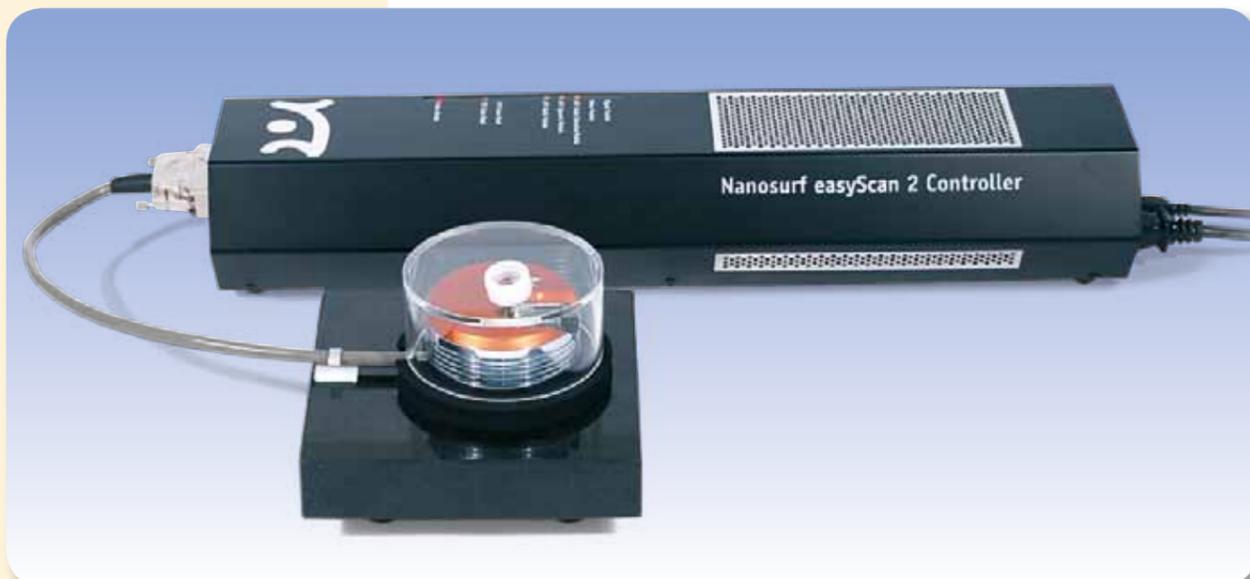


Fig. 3 Tension limite  $U_0$  en fonction de l'intensité



### EXERCICES

- Visualisation des atomes d'une surface de graphite et analyse de la structure du réseau et des forces d'interaction entre les atomes.
- Caractérisation physique d'une surface en or et mesure de la hauteur des marches atomiques.

### OBJECTIF

Caractérisation physique de la structure atomique d'une surface en graphite et d'une surface en or

### RESUME

Un microscope à effet tunnel (STM) est utilisé pour l'analyse microscopique de matériaux conducteurs avec une résolution atomique. La sonde utilisée est une pointe métallique extrêmement fine qui balaye la surface de l'échantillon de façon linéaire et avec des mouvements contrôlés de près. On mesure la valeur du courant tunnel qui se propage alors entre la pointe et l'échantillon et on maintient ce courant constant en variant la distance séparant la pointe de l'échantillon. Les grandeurs modifiées sont traitées pour former une image de la surface de l'échantillon où est représentée la superposition de la topographie de l'échantillon et de la conductivité électrique.

### DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre                    | Appareil                         | Référence |
|---------------------------|----------------------------------|-----------|
| 1                         | Microscope à effet tunnel        | 1012782   |
| <b>En plus recommandé</b> |                                  |           |
| 1                         | Échantillon de TaSe <sub>2</sub> | 1012875   |

### GENERALITES

Un microscope à effet tunnel est équipé d'une sonde métallique très pointue qui se déplace au-dessus de la surface d'un matériau conducteur à une distance si faible que lorsqu'une tension électrique est appliquée entre la pointe et la surface de l'échantillon, il se crée une interaction appelée courant tunnel. Des variations minimales de l'ordre de 0,01 nm de la distance pointe-échantillon entraînent des modifications mesurables de la valeur du courant tunnel, celui-ci dépendant exponentiellement de cette distance. On procède au balayage de la structure atomique de l'échantillon en déplaçant la pointe métallique ligne après ligne au-dessus de toute la surface de l'échantillon tout en contrôlant la distance pointe-échantillon de telle façon que le courant tunnel reste constant. Les déplacements effectués sont tracés en temps réel sous forme d'une image sur l'écran de l'ordinateur. L'image créée sur l'ordinateur est une superposition de

### la topographie de l'échantillon et de la conductivité électrique de la surface de l'échantillon.

Dans l'expérience, on procède dans un premier temps à la fabrication de la sonde à partir d'un fil de platine-iridium. L'objectif est de réaliser une pointe de forme telle qu'on peut l'assimiler à une orbitale atomique de type s. La préparation de l'échantillon de graphite consiste à le nettoyer de ses impuretés : on colle un morceau de ruban adhésif à la surface de l'échantillon puis on l'enlève, ce qui laisse la surface parfaitement propre. Pour les autres matériaux étudiés, il suffit de veiller à ce que l'échantillon reste propre et exempt de gras. Afin d'obtenir une image avec une bonne résolution atomique, il faut : une grande précision de travail pendant l'expérience, une pointe métallique bien effilée, et une surface d'échantillon parfaitement lisse. Après chaque modification d'un paramètre de mesure, il est recommandé de procéder à plusieurs balayages de la surface avec la pointe avant d'enregistrer l'image définitive. Il est recommandé de procéder à plusieurs balayages avant de modifier à nouveau un paramètre.

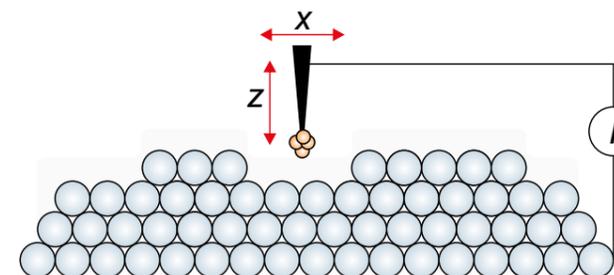


Fig. 1 Représentation schématique du courant tunnel

### EVALUATION

Dans l'image de la structure hexagonale du graphite, on trouve des atomes de carbone représentés en alternance en clair et en foncé. Les premiers, de couleur claire, sont des atomes sans voisins directs, les seconds, de couleur foncée, sont les atomes disposant de voisins directs dans la couche d'atomes sous-jacente. Les premiers sont donc plus clairs parce qu'ils possèdent une plus grande densité d'électrons. On utilise les outils du logiciel pour mesurer les distances et les angles entre les atomes ainsi identifiés. L'analyse de la surface en or au moyen d'une pointe appropriée permet d'identifier les marches atomiques dont on peut ensuite mesurer la hauteur.

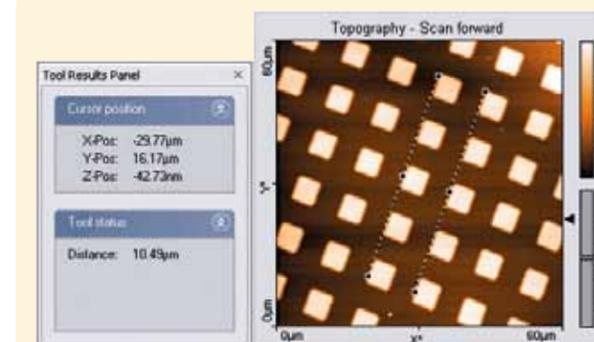
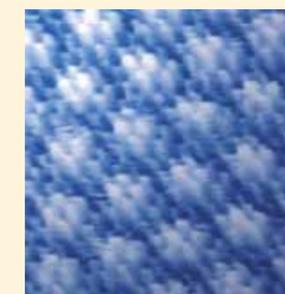


Fig. 2 Détermination de l'écart atomique

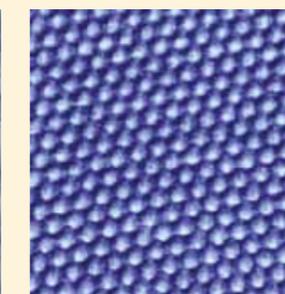
Caractérisation physique d'une surface en or



Caractérisation physique d'une surface de TaS<sub>2</sub> avec des ondes de densité de charge statiques



Représentation de la structure hexagonale d'une surface en graphite





**OBJECTIF**

Observation de la diffraction d'électrons sur graphite polycristallin et confirmation de la nature ondulatoire des électrons

**EXERCICES**

- Détermination du diamètre des deux anneaux de diffraction pour différentes tensions d'accélération.
- Détermination de la longueur d'onde des électrons pour différentes tensions d'accélération à partir de la condition de Bragg.
- Confirmation de l'hypothèse de Broglie pour la longueur d'onde.

**RESUME**

La diffraction d'électrons sur un film graphite polycristallin démontre la nature ondulatoire des électrons. L'on observe sur l'écran fluorescent des tubes de diffraction d'électrons deux anneaux de diffraction placés autour d'une tâche centrale dans la direction du faisceau. Ces anneaux sont générés par la diffraction d'électrons sur les plans réticulaires des microcristaux sur le film graphite qui satisfont à la condition de Bragg. L'observation est comparable au résultat de la diffraction Debye-Scherrer de rayons X sur une poudre cristalline.

**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Tube de diffraction d'électrons S                 | 1013889    |
| 1      | Support pour tube S                               | 1014525    |
| 1      | Alimentation haute tension 5 kV (230 V, 50/60 Hz) | 1003310 ou |
|        | Alimentation haute tension 5 kV (115 V, 50/60 Hz) | 1003309    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm              | 1002843    |

**GENERALITES**

En 1924, Louis de Broglie émet l'hypothèse que les particules possèdent fondamentalement des caractéristiques ondulatoires où la longueur d'onde dépend de l'impulsion. Ses réflexions ont été confirmées par C. Davisson et L. Germer par le biais de la diffraction d'électrons sur du nickel cristallin.

Pour expliquer le rapport entre la longueur d'onde  $\lambda$  d'une particule et son impulsion  $p$ , de Broglie pose l'équation

$$(1) \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

$h$ : Constante de Planck

Cette équation peut être transformée, pour les électrons qui ont subi une tension d'accélération  $U_A$  en l'équation



(2)

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot m \cdot e \cdot U_A}}$$

$m$ : Masse d'électron,  $e$ : Charge élémentaire

Si la tension d'accélération est de 4 kV, il est alors possible d'attribuer aux électrons une longueur d'onde d'environ 20 pm. Dans l'expérience, la nature ondulatoire des électrons dans un tube de verre sous vide est démontrée par diffraction sur graphite polycristallin. Sur l'écran fluorescent du tube en verre, l'on observe des anneaux de diffraction autour d'une tâche centrale dans la direction du faisceau et dont le diamètre dépend de la tension d'accélération. Ces anneaux sont générés par diffraction d'électrons sur les plans réticulaires de microcristaux qui satisfont à la condition de Bragg

(3)

$$2 \cdot d \cdot \sin \vartheta = n \cdot \lambda$$

$\vartheta$ : Angle de Bragg,  $n$ : Ordre de diffraction,  $d$ : Distance entre les plans réticulaires

(cf. fig. 2). Le diamètre de l'anneau de diffraction attribué à l'angle de Bragg-Winkel  $\vartheta$  est de

(4)

$$D = 2 \cdot L \cdot \tan 2\vartheta$$

$L$ : Distance entre film graphite et écran fluorescent.

Comme le graphite présente une structure cristalline avec deux distances de plans réticulaires  $d_1 = 123$  pm et  $d_2 = 213$  pm (cf. fig. 3), l'on observera dans le premier ordre de diffraction ( $n = 1$ ) deux anneaux de diffraction avec les diamètres  $D_1$  et  $D_2$ .

**EVALUATION**

La longueur d'onde  $\lambda$  peut être définie à partir des diamètres des deux anneaux de diffraction et des distances de plans réticulaires en appliquant la condition de Bragg. Pour un petit angle d'ouverture, l'on obtient :

$$\lambda = 2 \cdot d_{1/2} \cdot \sin \left( \frac{1}{2} \cdot \arctan \left( \frac{D_{1/2}}{2 \cdot L} \right) \right)$$

La longueur d'onde ainsi calculée sera comparée avec celle calculée avec (2).

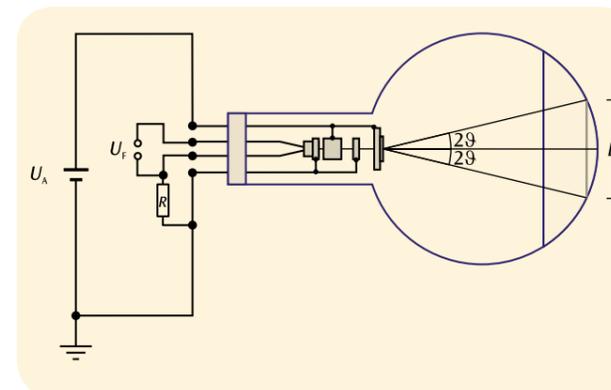


Fig. 1 Représentation schématique des tubes de diffraction d'électrons

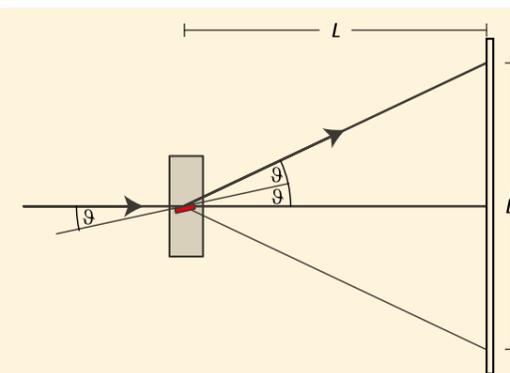


Fig. 2 Réflexion de Bragg sur un ensemble « adapté » de plans réticulaires d'un cristal sélectionné sur un film graphite

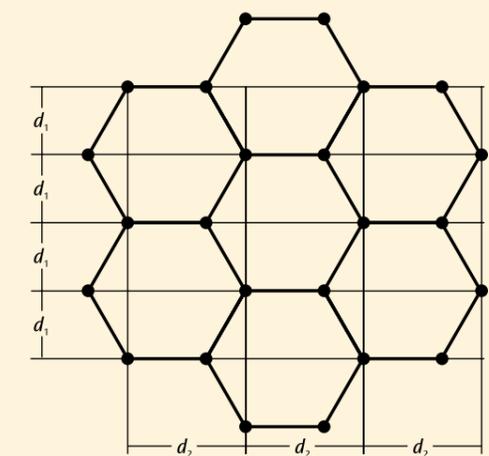


Fig. 3 Structure cristalline du graphite

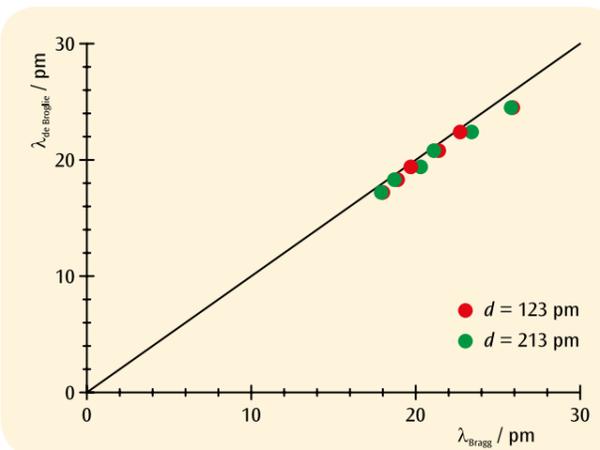


Fig. 4 Longueur d'onde calculée à partir de la condition de Bragg en fonction de la longueur d'onde de Broglie



## EXERCICES

- Enregistrer le spectre de raies de l'hydrogène.
- Déterminer les fréquences des spectres  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$  et  $H_\delta$  à partir de la série de Balmer de l'hydrogène.
- Calculer les constantes de Rydberg.
- Enregistrer et évaluer les spectres de raies de gaz nobles et de vapeurs de métaux.

## OBJECTIF

Enregistrement et évaluation de la série de Balmer de l'hydrogène et d'autres spectres de raies dans le domaine visible

## RESUME

Les spectres de raies provenant des atomes émettant de la lumière sont caractéristiques pour l'élément chimique. Mais leur complexité augmente avec le nombre atomique des éléments. En revanche, la partie visible du spectre de l'hydrogène atomique s'explique aisément à l'aide du modèle de Bohr.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre                      | Appareil  | Référence  |
|-----------------------------|---|------------|
| 1                           | Spectromètre LD, numérique                          | 1018103    |
| 1                           | Alimentation pour tubes spectraux (230 V, 50/60 Hz) | 1000684 ou |
|                             | Alimentation pour tubes spectraux (115 V, 50/60 Hz) | 1000683    |
| 1                           | Tube spectral hydrogène                             | 1003409    |
| 1                           | Socle de serrage, 1000 g                            | 1002834    |
| <b>En plus recommandé :</b> |   |            |
| 1                           | Tube spectral hélium                                | 1003408    |
| 1                           | Tube spectral néon                                  | 1003413    |
| 1                           | Tube spectral argon                                 | 1003403    |
| 1                           | Tube spectral krypton                               | 1003411    |
| 1                           | Tube spectral mercure                               | 1003412    |
| 1                           | Tube spectral brome                                 | 1003404    |
| 1                           | Tube spectral iode                                  | 1003410    |



## GENERALITES

Les atomes émettant de la lumière dans un gaz lumineux produisent des spectres constitués de nombreuses raies qui sont séparées entre elles, même si elles peuvent apparaître en grand nombre à certains endroits. Les raies sont caractéristiques de l'élément chimique, car chacune d'elles correspond à une transition entre deux niveaux d'énergie distincts dans l'enveloppe électronique de l'atome.

Dans le domaine visible, le spectre d'émission de l'hydrogène atomique présente quatre raies  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$  et  $H_\delta$  qui se suivent dans une série complète dans l'ultraviolet. En 1885, J.J. Balmer a établi une formule empirique pour les fréquences de cette série :

$$(1) \quad \nu = R \cdot \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$n = 3, 4, 5, 6 \dots$$

$R = 3290 \text{ THz}$ : Constante de Rydberg

Plus tard, la série de fréquences a pu être expliquée aisément à l'aide du modèle atomique de Bohr sur la base de l'énergie cédée par l'électron lors de sa transition de couches supérieures à la deuxième couche de l'atome d'hydrogène.

Le spectre de raies de l'atome d'hélium, qui ne contient pourtant qu'un électron de plus, est déjà bien plus complexe que celui de l'atome d'hydrogène, car les spins des deux électrons peuvent s'orienter dans un axe parallèle ou antiparallèle et occuper ainsi un nombre quelconque de niveaux d'énergie différents dans l'atome d'hélium.

La complexité continue à augmenter pour tous les autres éléments chimiques. Mais dans tous les cas, le spectre de raies est caractéristique pour l'élément.

## EVALUATION

Dans la représentation  $\nu = f(1/n^2)$ , les fréquences de la série de Balmer se situent sur une droite lorsqu'on assigne à la raie  $H_\alpha$  le nombre  $n = 3$ , à la raie  $H_\beta$  la valeur  $n = 4$ , etc. (voir la figure 1).

La pente de la droite correspond à la constante de Rydberg  $R$ . Le point d'intersection avec l'axe x se situe à 0,25, car les transitions de la série de Balmer sont orientées vers le niveau d'énergie  $n = 2$ .

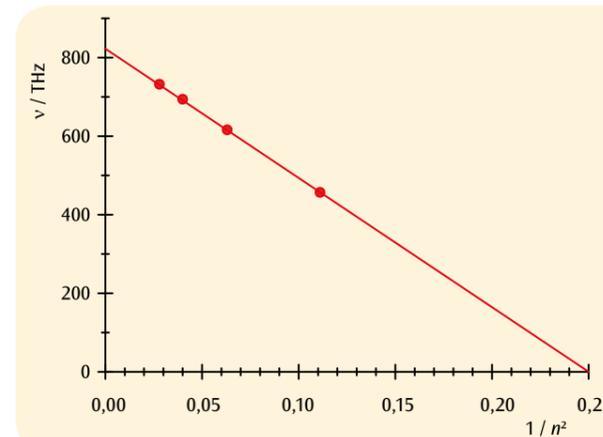


Fig. 1 Fréquences de transition de la série de Balmer en fonction de  $1/n^2$

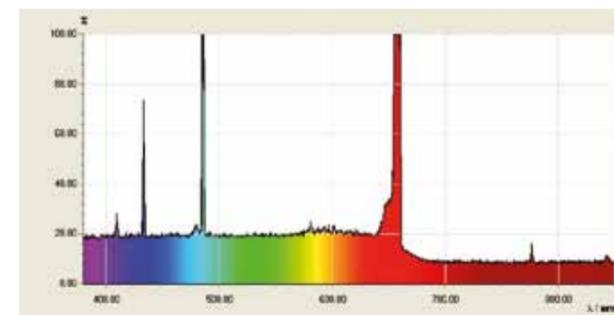


Fig. 2 Spectre de raies de l'hydrogène atomique

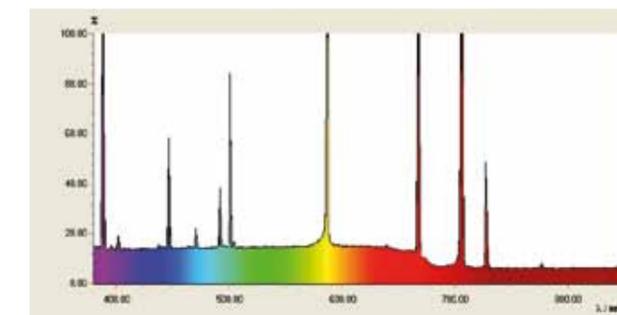


Fig. 3 Spectre de raies de l'hélium

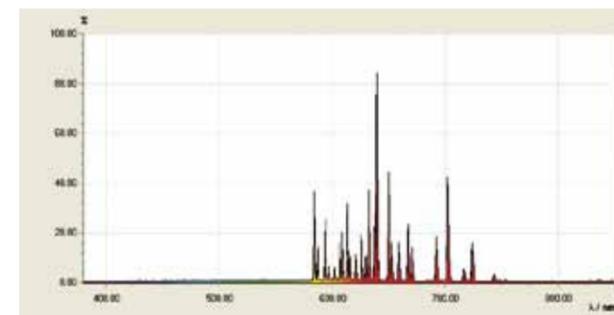


Fig. 4 Spectre de raies du néon

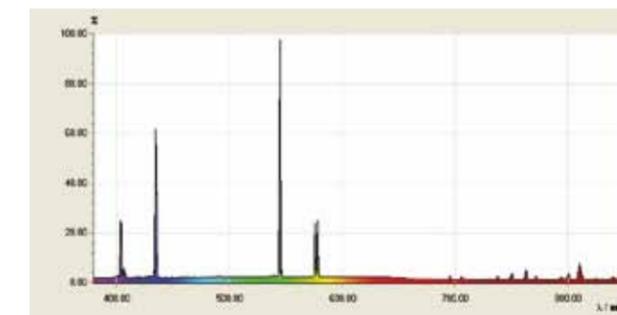


Fig. 5 Spectre de raies du mercure



EXERCICES

- Démontrer la structure fine dans la raie D du sodium.
- Mesurer les raies d'absorption dans le spectre solaire.
- Mesure à haute résolution des raies spectrales d'autres atomes.

OBJECTIF

Mesure à haute résolution de raies d'absorption et d'émission

RESUME

La capacité de résolution d'un spectromètre est souvent évaluée en fonction de sa capacité de séparer les deux raies D du sodium. Dans l'expérience, on utilise un spectromètre numérique qui permet cette opération.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre                      | Appareil  | Référence  |
|-----------------------------|---|------------|
| 1                           | Spectromètre HD, numérique                            | 1018104    |
| 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 Na                                     | 1003541    |
| 2                           | Socle de serrage, 1000 g                              | 1002834    |
| <b>En plus recommandé :</b> |   |            |
| 1                           | Lampe spectral Hg 100                                 | 1003545    |
| 1                           | Lampe spectral Hg/ Cd                                 | 1003546    |



GENERALITES

La capacité de résolution d'un spectromètre caractérise la limite de performance de l'appareil. Il indique l'écart minimum des longueurs d'onde entre deux raies spectrales voisines encore séparées. Une paire célèbre de raies est le doublet de la raie D du sodium avec un écart des longueurs d'onde de 0,6 nm. La capacité de résolution d'un spectromètre est souvent évaluée en fonction de la capacité de séparer ces deux raies.

La raie D du sodium se forme par émission lors de la transition de l'électron 3s de sodium de l'état 3p excité vers l'état initial. Comme le spin électronique et le moment cinétique orbital sont couplés (couplage spin-orbite), l'état 3p est divisé en deux états fins avec un moment cinétique total  $j = 1/2$  ou  $j = 3/2$ . La différence d'énergie des deux états fins s'élève à 0,0021 eV, les longueurs d'onde des transitions vers l'état initial à 588,9950 nm (D2) et 589,5924 nm (D1).

Dans l'expérience, on utilise un spectromètre numérique qui permet une résolution de la structure fine dans la raie D du sodium. La décomposition spectrale de la lumière incidente est provoquée par l'emploi d'un réseau de 1 200 raies par mm dans un monochromateur de Czerny-Turner. La plage spectrale, répartie sur une matrice CCD de 3 600 pixels, est mesurable entre 400 et 700 nm. Par conséquent, un pixel est disponible pour chaque intervalle de longueur d'onde de 0,08 nm. On obtient ainsi une capacité de résolution de 0,5 nm. La structure fine dans la raie D du sodium peut donc être mesurée.

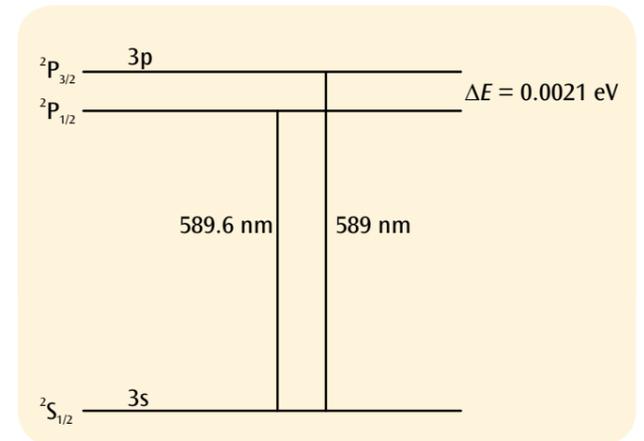


Fig. 1 Diagramme de Grotrian simplifié du sodium

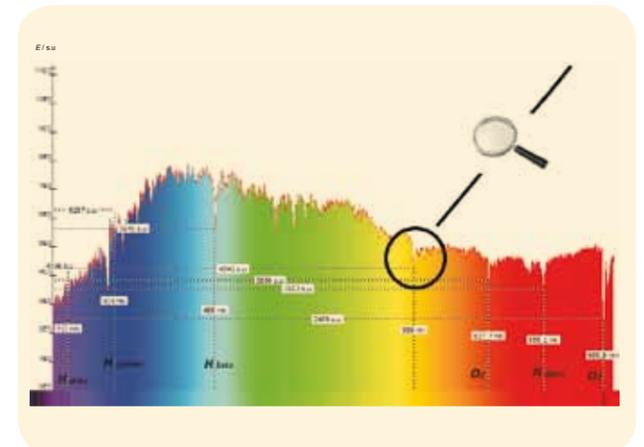


Fig. 2 Raies d'absorption dans le spectre solaire

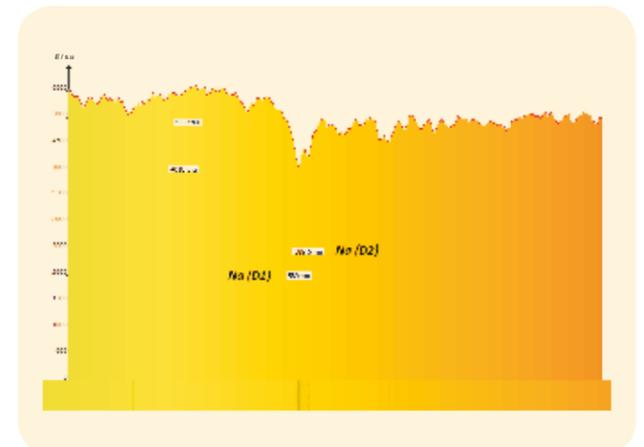


Fig. 3 Raies d'absorption du sodium dans le spectre solaire



## EXERCICES

- Mesure du courant de plaque  $I$  en fonction de la tension  $U$  entre la cathode et la grille.
- Détermination de l'écart  $\Delta U$  des maxima ou minima de courant.
- Comparaison entre l'écart de tension et l'énergie d'excitation des atomes de mercure.

## OBJECTIF

Enregistrement et évaluation de la courbe de Franck et Hertz sur le mercure

## RESUME

L'expérience de Franck et Hertz permet d'observer l'émission d'énergie des électrons après une collision inélastique lors du passage à travers la vapeur de mercure. Cette émission est progressive, car la collision entraîne une transmission d'énergie dans l'atome de mercure. L'expérience fournit ainsi la confirmation du modèle d'atome de Bohr et les niveaux d'énergie discrets dans les atomes.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil   | Référence  |
|--------|--|------------|
| 1      | Tube de Franck et Hertz au Hg et four de chauffage (230 V, 50/60 Hz) | 1006795 ou |
|        | Tube de Franck et Hertz au Hg et four de chauffage (115 V, 50/60 Hz) | 1006794    |
| 1      | Appareil pour l'expérience de Franck et Hertz (230 V, 50/60 Hz)      | 1012819 ou |
|        | Appareil pour l'expérience de Franck et Hertz (115 V, 50/60 Hz)      | 1012818    |
| 1      | Oscilloscope analogique, 2x30 MHz                                    | 1002727    |
| 1      | Multimètre numérique P3340   | 1002785    |
| 1      | Cordon HF  | 1002746    |
| 2      | Cordon HF, BNC / douille 4 mm  | 1002748    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm                                 | 1002843    |

2

## GENERALITES

En 1914, James Franck et Gustav Hertz rapportèrent que des électrons cédaient progressivement leur énergie au passage à travers la vapeur de mercure et qu'on pouvait observer en même temps l'émission de la ligne ultraviolette ( $\lambda = 254 \text{ nm}$ ) du mercure. Quelques mois plus tard, Niels Bohr y reconnut une preuve du modèle d'atome qu'il avait développé. Aussi l'expérience de Franck et Hertz sur le mercure constitue-telle une expérience classique permettant de confirmer la théorie quantique.

Dans un tube en verre sous vide, on trouve successivement une cathode chauffée C, une grille G et une électrode A (cf. Fig. 1). Des électrons s'échappant par la cathode sont accélérés vers la grille par une tension  $U$ . Ils traversent la grille et contribuent au courant  $I$  lorsque leur énergie cinétique suffit à surmonter la contre-tension (tension de retard)  $U_{GA}$  entre la grille et la plaque. En outre, le tube contient une goutte de mercure qui est réchauffée à une pression de vapeur d'environ 15 hPa.

Au fur et à mesure qu'augmente la tension  $U$ , le courant de plaque  $I$  augmente également dans un premier temps, car de plus en plus d'électrons sont aspirés par le champ électrique croissant du nuage de charge autour de la cathode. A partir d'une certaine valeur  $U = U_1$  toutefois, juste avant d'atteindre la grille, les électrons ont suffisamment d'énergie cinétique pour céder par une collision inélastique l'énergie requise à l'excitation d'un atome de mercure. Le courant de plaque chute pratiquement jusqu'à zéro, car les électrons ne sont plus en mesure de surmonter la contre-tension après la collision. La tension continuant à augmenter, les électrons présentent l'énergie nécessaire à l'excitation d'un atome de mercure toujours plus tôt devant la grille. Après la collision, ils sont de nouveau accélérés et obtiennent suffisamment d'énergie cinétique pour accéder à la plaque. Le courant de plaque recommence donc à augmenter.

En présence d'une tension encore plus élevée  $U = U_2$ , les électrons prennent une deuxième fois une telle quantité d'énergie après la première collision qu'ils peuvent exciter un deuxième atome de mercure. Avec cette tension, le courant de plaque chute considérablement pour augmenter de nouveau lorsque la tension augmente, jusqu'à ce qu'il retombe une troisième fois et, si les tensions sont encore plus élevées, plusieurs fois par la suite.

## NOTE

La première valeur de tension  $U_1$  ne se situe pas à 4,9 V, mais est décalée de la tension de contact régnant entre la cathode et la grille.

## EVALUATION

Les tensions  $U_1, U_2, U_3, \dots$ , où le courant chute fortement dans la caractéristique mesurée  $I(U)$ , présente un écart constant  $\Delta U = 4,9 \text{ V}$ . Cet écart correspondant à l'énergie d'excitation  $E_{Hg} = 4,9 \text{ eV}$  ( $\lambda = 254 \text{ nm}$ ) des atomes de mercure depuis l'état initial  $^1S_0$  au premier état  $^3P_1$ . On a l'équation suivante :

$$(1) \quad E_{Hg} = e \cdot \Delta U$$

$e$  : Charge élémentaire

Le résultat de la mesure résulte donc de l'absorption discrète de l'énergie par les atomes de mercure en cas de collision inélastique et ainsi de la cession d'une part fixe d'énergie par les électrons.

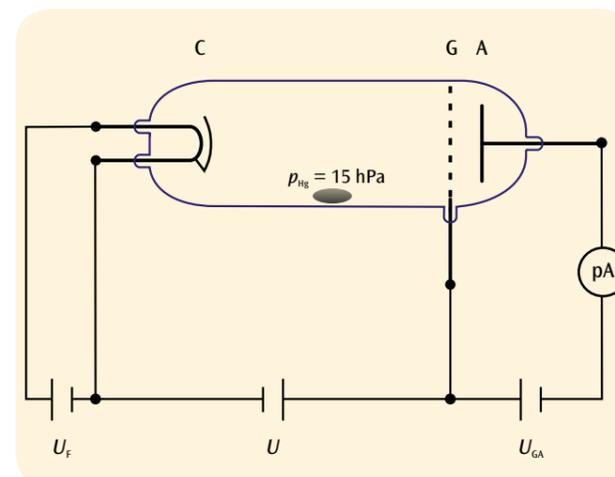


Fig. 1 Structure schématique de l'enregistrement de la courbe de Franck et Hertz sur le mercure

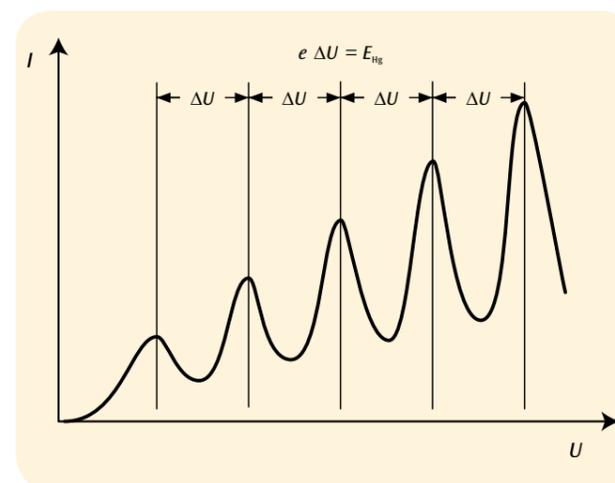
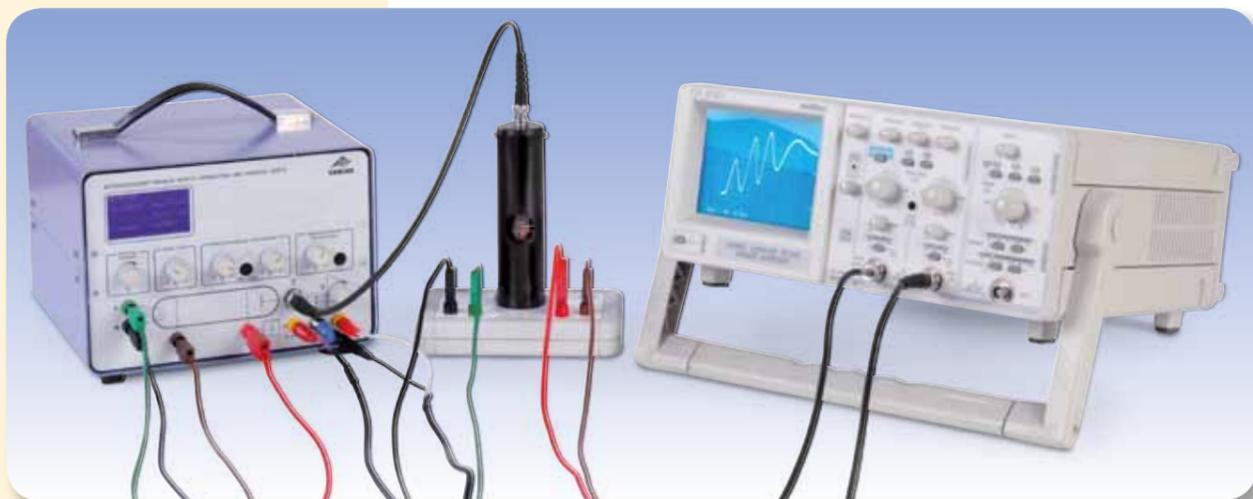


Fig. 2 Courant de plaque  $I$  en fonction de la tension d'accélération  $U$



## EXERCICES

- Mesure du courant de plaque  $I$  en fonction de la tension  $U$  entre la cathode et la grille.
- Comparaison entre la position des maxima de courant et les énergies d'excitation des atomes de néon.
- Observation de la lumière émise par les atomes de néon excités.
- Détermination du nombre de couches lumineuses à différentes tensions d'accélération.

## OBJECTIF

Enregistrement et évaluation de la courbe de Franck et Hertz sur le néon et observation de l'émission de lumière

## RESUME

L'expérience de Franck et Hertz sur le néon permet d'observer l'émission d'énergie des électrons après une collision inélastique lors du passage à travers la vapeur de néon. Cette émission est progressive, car les collisions entraînent des transmissions d'énergie caractéristiques dans les atomes de néon. Les atomes excités émettent de la lumière dans la gamme visible.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Tube de Franck et Hertz au néon                                 | 1000912    |
| 1      | Appareil pour l'expérience de Franck et Hertz (230 V, 50/60 Hz) | 1012819 ou |
|        | Appareil pour l'expérience de Franck et Hertz (115 V, 50/60 Hz) | 1012818    |
| 1      | Oscilloscope analogique, 2x30 MHz                               | 1002727    |
| 1      | Multimètre numérique P3340                                      | 1002785    |
| 1      | Cordon HF   | 1002746    |
| 2      | Cordon HF, BNC / douille 4 mm                                   | 1002748    |
| 1      | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm                            | 1002843    |



## GENERALITES

Au cours de l'expérience de Franck et Hertz sur le néon, des atomes de néons sont excités par une collision inélastique d'électrons. Les atomes excités émettent une lumière visible qui peut être observée directement. On reconnaît les zones de forte densité lumineuse ou d'excitation, dont la position entre la cathode et la grille dépend de la différence de tension entre les deux.

Dans un tube en verre sous vide, rempli de néon à une pression de 10 hPa, on trouve successivement une cathode chauffée C, une grille de commande S, une grille G et une électrode A (cf. Fig. 1). Des électrons s'échappant par la cathode sont accélérés vers la grille par une tension  $U$ . Ils traversent la grille et contribuent au courant  $I$  lorsque leur énergie cinétique suffit à surmonter la contre-tension  $U_{GA}$  entre la grille et la plaque.

La caractéristique  $I(U)$  (cf. Fig. 2) est similaire à celle de l'expérience de Franck et Hertz sur le mercure, mais à des intervalles de tension d'environ 19 V. En d'autres termes, le courant de plaque chute pratiquement à zéro à une certaine valeur  $U = U_1$ , car, par la collision inélastique, les électrons atteignent juste avant la grille suffisamment d'énergie cinétique pour céder l'énergie requise à l'excitation d'un atome de néon. En même temps, on observe à proximité de la grille une lumière rouge-orange, car l'une des transitions des atomes de néon de relaxation émet une lumière de cette couleur. La zone lumineuse se déplace vers la cathode au fur et à mesure qu'augmente la tension  $U$ , en même temps le courant de plaque  $I$  augmente à nouveau.

Si la tension  $U = U_2$  est encore plus élevée, le courant de plaque chute fortement et l'on observe deux zones lumineuses : l'une au milieu, entre la cathode et la grille, et l'autre directement à hauteur de la grille. Les électrons prennent une deuxième fois une telle quantité d'énergie après la première collision qu'ils peuvent exciter un deuxième atome de néon.

Au fur et à mesure que les tensions continuent à augmenter, on peut observer une diminution du courant de plaque et d'autres couches lumineuses.

## EVALUATION

La caractéristique  $I(U)$  présente plusieurs maxima et minima : l'écart entre les minima s'élève à environ  $\Delta U = 19$  V, ce qui correspond aux énergies d'excitation des niveaux 3p dans l'atome de néon (cf. Fig. 3) qui seront très probablement excités. L'excitation des niveaux 3s ne peut pas être entièrement négligée et engendre une sous-structure dans la caractéristique  $I(U)$ .

Les zones lumineuses sont des zones de forte densité d'excitation et correspondent aux chutes de courant dans la caractéristique  $I(U)$ . L'augmentation de  $U$  d'environ 19 V entraîne la génération d'une couche lumineuse supplémentaire.

## NOTE

Le premier minimum ne se situe pas à 19 V, mais est décalé de la tension de contact régnant entre la cathode et la grille.

Les lignes spectrales du néon peuvent être observées et mesurées sans problème à l'aide du spectroscope (1003184), lorsqu'on choisit la tension maximale  $U$ .

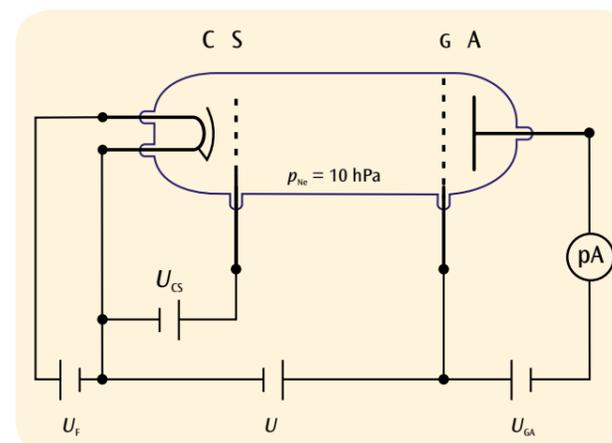


Fig. 1 Structure schématique de l'enregistrement de la courbe de Franck et Hertz sur le néon

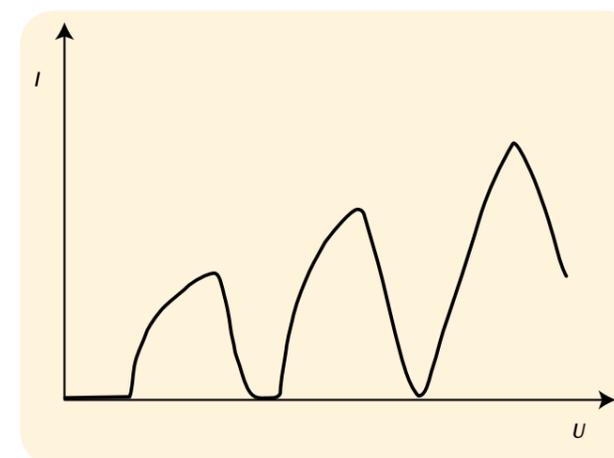


Fig. 2 Courant de plaque  $I$  en fonction de la tension d'accélération  $U$

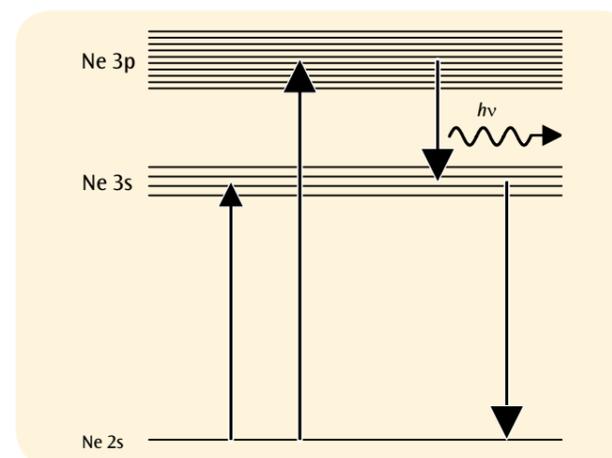


Fig. 3 Schéma de l'énergie des atomes de néon



EXERCICES

- Mesure du courant collecteur  $I_R$  en fonction de la tension d'accélération  $U_A$ .
- Comparaison de la situation des maxima de densité de courant avec les potentiels critiques de l'atome d'hélium.
- Identification de la double structure dans le schéma du terme spectral de l'hélium (orthohélium et parahélium).

OBJECTIF

Détermination des potentiels critiques de l'atome d'hélium

RESUME

Les potentiels critiques désignent de manière générale toutes les énergies d'excitation et d'ionisation présentes dans la couche électronique d'un atome. Les états afférents sont par exemple provoqués par bombardement électronique inélastique. Si l'énergie cinétique de l'électron correspond à un potentiel critique, l'électron perd complètement son énergie cinétique lors du bombardement électronique inélastique. Ce principe est utilisé dans le cadre d'un montage expérimental élaboré par G. Hertz pour la définition des potentiels critiques.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre                      | Appareil  | Référence  |
|-----------------------------|---|------------|
| 1                           | Tube aux potentiels critiques S, remplissage d'Hélium                     | 1000620    |
| 1                           | Support pour tube S   | 1014525    |
| 1                           | Unité de commande pour le tube aux potentiels critiques (230 V, 50/60 Hz) | 1008506 ou |
|                             | Unité de commande pour le tube aux potentiels critiques (115 V, 50/60 Hz) | 1000633    |
| 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    |
| 1                           | Multimètre numérique P3340  | 1002785    |
| 1                           | Oscilloscope USB 2x50 MHz   | 1017264    |
| 2                           | Cordon HF, BNC / douille 4 mm   | 1002748    |
| 1                           | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm                                      | 1002843    |
| <b>En plus recommandé :</b> |   |            |
| 1                           | 3B NET/log™ (230 V, 50/60 Hz)   | 1000540 ou |
|                             | 3B NET/log™ (115 V, 50/60 Hz)   | 1000539    |
| 1                           | 3B NET/lab™   | 1000544    |



GENERALITES

Le terme de potentiels critiques englobe toutes les énergies d'excitation et d'ionisation présentes dans l'enveloppe électronique d'un atome. Les états atomiques afférents sont par exemple provoqués par bombardement électronique inélastique. Si l'énergie cinétique de l'électron correspond à un potentiel critique, l'électron transmet entièrement son énergie cinétique à l'atome lors du bombardement électronique inélastique. Ce principe peut être utilisé dans le cadre d'un montage expérimental élaboré par G. Hertz pour la définition des potentiels critiques.

Dans un tube mis sous vide et rempli d'hélium, des électrons libres circulent de manière divergente à travers un espace à potentiel constant après la traversée d'une tension d'accélération  $U_A$ . Afin d'empêcher toute charge de la paroi du tube, l'intérieur est recouvert d'un matériau conducteur et relié à l'anode A par conduction (cf. fig. 1). Une électrode de collecteur R annulaire est disposée dans le tube ; elle n'est pas touchée par le faisceau d'électrons divergent, bien qu'elle soit soumise à un potentiel légèrement plus élevé.

On mesure le courant  $I_R$  – de l'ordre du picoampère – appliqué au collecteur en fonction de la tension d'accélération  $U_A$ . Il affiche des maxima caractéristiques, étant donné que les électrons qui se déplacent dans le tube subissent des chocs inélastiques avec les atomes d'hélium : si leur énergie cinétique

$$(1) \quad E = e \cdot U_A$$

$e$ : Charge élémentaire

correspond exactement à un potentiel critique de l'atome d'hélium, ils cèdent entièrement leur énergie cinétique aux atomes d'hélium. Dans ce cas, ils peuvent être aspirés par le collecteur et contribuer ainsi à l'augmentation de la densité du courant collecteur  $I_R$ . Avec l'augmentation progressive de la tension d'accélération, il est possible d'atteindre des niveaux d'excitation toujours plus élevés dans l'hélium, jusqu'à ce que l'énergie cinétique de l'électron suffise pour obtenir l'ionisation de l'atome d'hélium. A partir de cette valeur, le courant collecteur augmente continuellement, proportionnellement à l'augmentation de la tension d'accélération.

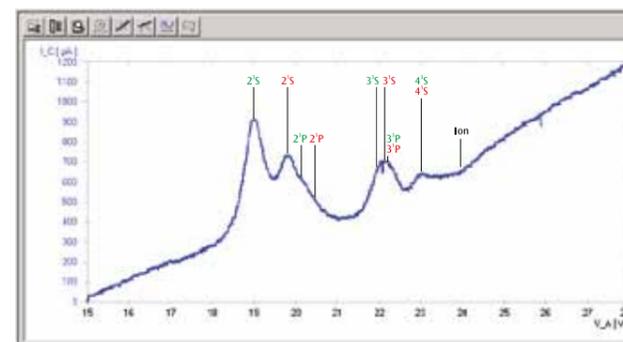


Fig. 3 : Courant collecteur  $I_R$  en fonction de la tension d'accélération  $U_A$

EVALUATION

Les couches des maxima de densité de courant sont comparées aux fins d'évaluation avec les valeurs fournies par les références bibliographiques sur les énergies d'excitation et le potentiel d'ionisation de l'atome d'hélium. Il faut tenir compte du fait que les maxima de ce que l'on appelle la tension de contact entre cathode et anode divergent des valeurs fournies par les références bibliographiques.

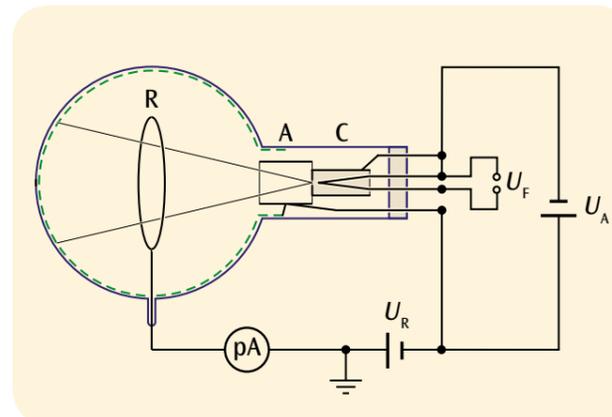


Fig. 1 Représentation schématique du tube à potentiel critique

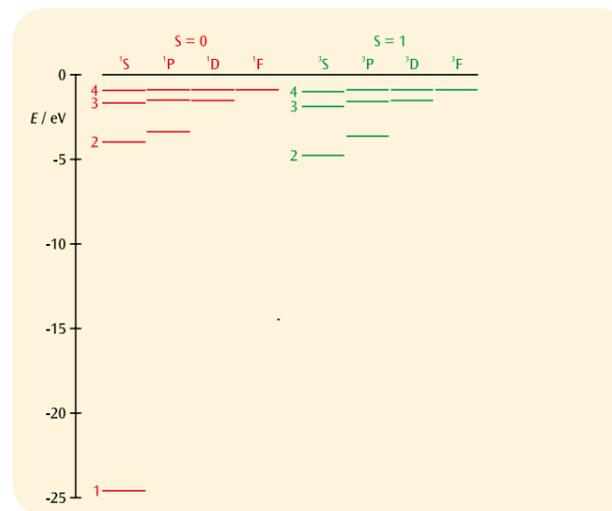


Fig. 2 : Schéma du terme spectral de l'hélium  
rouge : Spin total  $S = 0$  (parahélium),  
vert : Spin total  $S = 1$  (orthohélium)



## EXERCICES

- Observer la courbe de résonance du DPPH.
- Déterminer la fréquence de résonance en fonction du champ magnétique.
- Déterminer le facteur de Landé de l'électron libre.

## OBJECTIF

Mise en évidence de la résonance paramagnétique électronique sur du DPPH

## RESUME

La résonance paramagnétique électronique (RPE), appelée aussi résonance de spin électronique (ESR) est basée sur l'absorption d'énergie par des matériaux comportant des électrons non appariés qui sont placés dans un champ magnétique statique externe. L'énergie est prise dans un champ magnétique alternatif haute fréquence qui est perpendiculaire au champ statique. Si la fréquence du champ alternatif correspond à la fréquence de résonance, l'impédance de la bobine remplie du matériau analysé est modifiée par résonance et on peut observer une déviation sur l'oscilloscope. Le radical libre stable 1,1-diphényl-2-picryl-hydrazyl (DPPH) est un matériau adéquat pour la réalisation de ce test.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Equipement de base pour RSE/RME (230 V, 50/60 Hz) | 1000638 ou |
|        | Equipement de base pour RSE/RME (115 V, 50/60 Hz) | 1000637    |
| 1      | Équipement complémentaire RSE                     | 1000640    |
| 1      | Oscilloscope analogique, 2x30 MHz                 | 1002727    |
| 2      | Cordon HF   | 1002746    |

3

## GENERALITES

La résonance paramagnétique électronique (RPE) est basée sur l'absorption d'énergie par des matériaux comportant des électrons non appariés qui sont placés dans un champ magnétique statique externe. L'énergie est prise dans un champ magnétique alternatif haute fréquence qui est perpendiculaire au champ statique. Si la fréquence du champ alternatif correspond à la fréquence de résonance, l'impédance de la bobine remplie du matériau analysé est modifiée par résonance et on peut observer une déviation sur l'oscilloscope. La cause de l'absorption par résonance est le « basculement » du moment magnétique de l'électron libre. La fréquence de résonance dépend de la puissance du champ magnétique statique, la largeur du signal de résonance de son homogénéité.

Dans le champ magnétique  $B$ , le moment magnétique d'un électron avec un magnétisme de spin pur prend les états discrets

$$(1) \quad E_m = -g_l \cdot \mu_B \cdot m \cdot B, \quad m = -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$$

$$\mu_B = 9,274 \cdot 10^{-24} \frac{J}{T} : \text{le magnéton de Bohr}$$

$$g_l = 2,0023 : \text{le facteur de Landé.}$$

Par conséquent, la distance entre les deux niveaux d'énergie est de

$$(2) \quad \Delta E = g_l \cdot \mu_B \cdot B$$

L'effet de résonance est atteint au moment précis où la fréquence  $f$  du champ magnétique alternatif remplit la condition

$$(3) \quad h \cdot f = \Delta E,$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} : \text{constante de Planck.}$$

Dans l'expérience, la résonance paramagnétique électronique est mise en évidence avec du 1,1-diphényl-2-picryl-hydrazyl (DPPH), un composé organique dont les molécules présentent un électron non apparié. Le champ magnétique statique est généré par une paire de bobines de Helmholtz et traversé par un signal en dents de scie entre zéro et la valeur maximale  $B_{\max} = 3,5 \text{ mT}$ . À présent, on recherche la fréquence  $f$  à laquelle l'absorption par résonance est générée à une position précise de la dent de scie, c.-à-d. pour un champ magnétique prédéterminé.

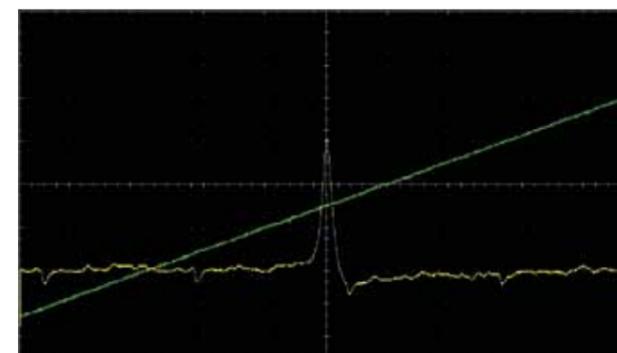


Fig. 1 Signal d'absorption et évolution temporelle du champ magnétique dans le cas d'un essai de résonance paramagnétique électronique sur du DPPH

## EVALUATION

À partir de (2) et (3), on déduit la relation suivante entre la fréquence de résonance  $f$  et le champ magnétique  $B$ .

$$f = g_l \cdot \frac{\mu_B}{h} \cdot B$$

Les valeurs mesurées se situent dans les limites de la précision de mesure sur une droite passant par l'origine, dont la pente permet de calculer le facteur de Landé.

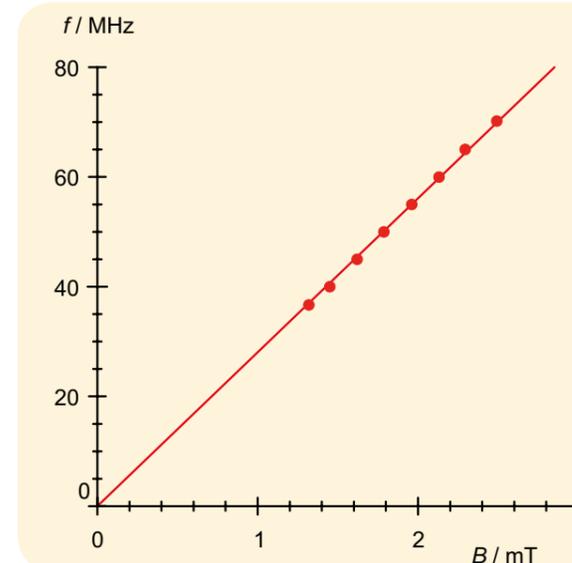


Fig. 2 Fréquence de résonance  $f$  en fonction du champ magnétique  $B$

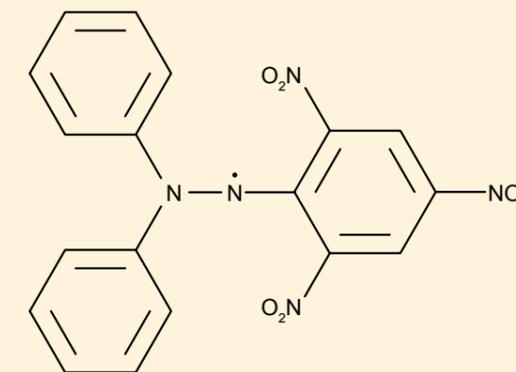
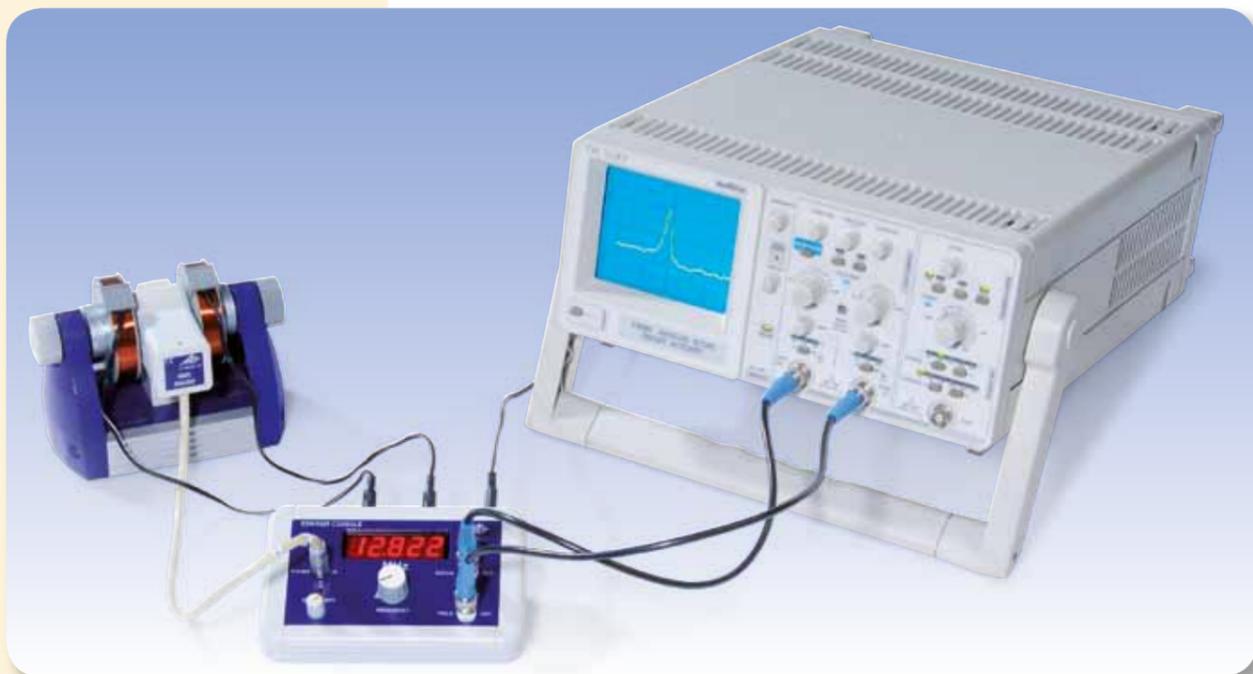


Fig. 3 Structure moléculaire du DPPH



### EXERCICES

- Mettre en évidence la résonance magnétique nucléaire de la glycérine, du polystyrène et du téflon.
- Déterminer la fréquence de résonance pour un champ magnétique fixe.
- Comparer avec les facteurs  $g$  des noyaux  $^1\text{H}$  et  $^{19}\text{F}$ .

### OBJECTIF

Mise en évidence et comparaison de la résonance magnétique nucléaire de la glycérine, du polystyrène et du téflon

### RESUME

La résonance magnétique nucléaire (RMN) fonctionne par le biais d'absorption d'énergie par certains matériaux possédant un noyau magnétique et placés dans un champ magnétique statique externe. L'énergie est prise dans un champ magnétique alternatif haute fréquence qui est perpendiculaire au champ statique. Si la fréquence du champ alternatif correspond à la fréquence de résonance, l'impédance de la bobine remplie du matériau analysé est modifiée par résonance et on peut observer une déviation sur l'oscilloscope. La glycérine, le polystyrène et le téflon sont des matériaux adéquats dont on utilise le moment magnétique du noyau  $^1\text{H}$  ou du noyau  $^{19}\text{F}$ .

### DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil  | Référence  |
|--------|---|------------|
| 1      | Équipement de base pour RSE/RME (230 V, 50/60 Hz) | 1000638 ou |
|        | Équipement de base pour RSE/RME (115 V, 50/60 Hz) | 1000637    |
| 1      | Équipement complémentaire RME                     | 1000642    |
| 1      | Oscilloscope analogique, 2x30 MHz                 | 1002727    |
| 2      | Cordon HF   | 1002746    |

3

### GENERALITES

La résonance magnétique nucléaire (RMN) fonctionne par le biais d'absorption d'énergie par les matériaux possédant un noyau magnétique et placés dans un champ magnétique statique externe. L'énergie est prise dans un champ magnétique alternatif haute fréquence qui est perpendiculaire au champ statique. Si la fréquence du champ alternatif correspond à la fréquence de résonance, l'impédance de la bobine remplie du matériau analysé est modifiée par résonance et on peut observer une déviation sur l'oscilloscope. La cause de l'absorption par résonance est une transition entre les états énergétiques du moment magnétique du noyau dans le champ magnétique. La fréquence de résonance dépend de la puissance du champ magnétique statique, la largeur du signal de résonance de son homogénéité.

Dans le champ magnétique  $B$ , le moment magnétique d'un noyau de spin  $I$  prend les états discrets

$$(1) \quad E_m = -g_l \cdot \mu_k \cdot m \cdot B, \quad m = -I, -I + 1, \dots, I$$

$$\mu_k = 5,051 \cdot 10^{-27} \frac{\text{J}}{\text{T}} : \text{magnéton nucléaire}$$

$$g_l : \text{facteur } g \text{ du noyau atomique.}$$

Par conséquent, la distance entre deux niveaux d'énergie est telle que

$$(2) \quad \Delta E = g_l \cdot \mu_k \cdot B$$

Lorsque les états énergétiques remplissent les conditions de résonance, un champ magnétique de fréquence  $f$  placé perpendiculairement au champ statique crée des transitions entre les états énergétiques voisins. La résonance est atteinte au moment précis où la fréquence  $f$  du champ magnétique alternatif remplit la condition

$$(3) \quad h \cdot f = \Delta E,$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} : \text{constante de Planck.}$$

Dans l'expérience, la résonance magnétique nucléaire est testée sur la glycérine, le polystyrène et le téflon, où l'isotope  $^1\text{H}$  contribue à la résonance dans la glycérine et le polystyrène et l'isotope  $^{19}\text{F}$  y contribue dans le téflon. Le champ magnétique statique est généré en majeure partie par un aimant permanent. On y ajoute par addition le champ magnétique statique d'une paire de bobines de Helmholtz qui est traversé par un signal en dents de scie entre zéro et la valeur maximale. À présent, on recherche la fréquence  $f$  où l'absorption de résonance a lieu dans un champ magnétique prédéfini que nous placerons pour simplifier au centre du signal en dents de scie.

### EVALUATION

Dans la littérature, les facteurs  $g$  des noyaux impliqués ont les valeurs suivantes :  $g_l(^1\text{H}) = 5,5869$  et  $g_l(^{19}\text{F}) = 5,255$ .

À partir de (2) et (3), on a pour la fréquence de résonance  $f$  dans un champ magnétique  $B$  l'équation :

$$f = g_l \cdot \frac{\mu_k}{h} \cdot B$$

Les fréquences de résonance pour différents noyaux dans un même champ magnétique sont donc situées dans le même rapport que les facteurs  $g$  :

$$\frac{f(^{19}\text{F})}{f(^1\text{H})} = \frac{g_l(^{19}\text{F})}{g_l(^1\text{H})} = 94\%$$

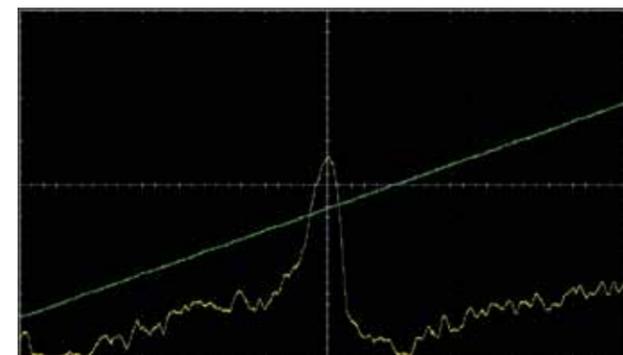


Fig. 1 Résonance magnétique nucléaire de la glycérine ( $f = 12,854 \text{ MHz}$ )

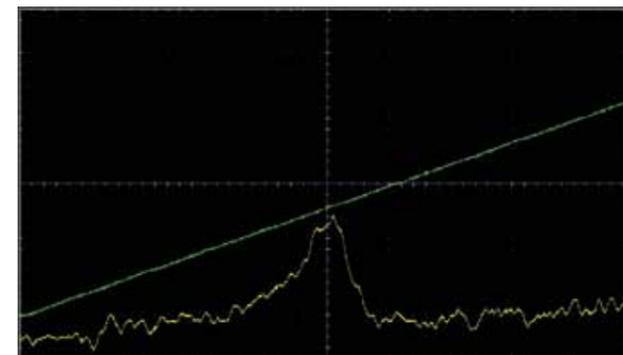


Fig. 2 Résonance magnétique nucléaire du polystyrène ( $f = 12,854 \text{ MHz}$ )

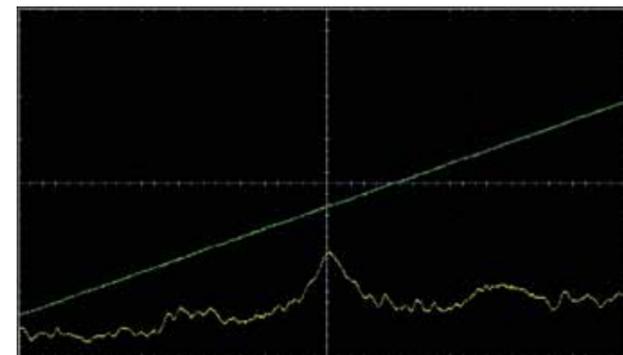


Fig. 3 Résonance magnétique nucléaire du téflon ( $f = 12,1 \text{ MHz}$ )



**OBJECTIF**

Calcul de l'énergie de gap (intervalle de bande) du germanium

**RESUME**

Les semi-conducteurs ne présentent une conductivité électrique mesurable qu'à des températures élevées. Cette dépendance de la température est due à la structure de bande des niveaux d'énergie électroniques avec une bande de valence, une bande de conduction et une zone intermédiaire qui, dans le cas d'un matériau semi-conducteur pur et non dopé, ne peut pas être occupée par des électrons. Au fur et à mesure que la température augmente, de plus en plus d'électrons sont agités thermiquement de la bande de valence vers la bande de

conduction et provoquent des « trous » en bande de valence. Sous l'effet d'un champ magnétique, les trous se comportent comme des particules de charge positive et contribuent comme les électrons à la densité de courant. Pour déterminer la conductivité du germanium pur et non dopé, l'expérience consiste à envoyer un courant constant à travers le cristal et à mesurer la baisse de tension en fonction de la température. Les données des mesures peuvent être considérées en première approximation comme une fonction exponentielle dans laquelle l'énergie de gap apparaît comme paramètre.

**EXERCICES**

- Mesurer la conductivité électrique du germanium non dopé en fonction de la température.
- Déterminer l'énergie de gap du germanium entre la bande de valence et la bande de conduction.

**NOTE**

Dans la pratique, la conductivité intrinsèque de semi-conducteurs purs non dopés joue un rôle secondaire. En règle générale, les cristaux présentent des défauts. Souvent, des cristaux très purs sont rendus conductibles par un dopage ciblé avec des atomes donneurs ou receveurs. Pour démontrer l'influence de ce dopage, il suffit de réaliser les études présentées ici sur du germanium dopé p et n. À température ambiante, la conductivité des cristaux dopés est nettement plus importante que celle du cristal pur, mais s'approche de la conductivité intrinsèque lorsque les températures sont élevées (voir fig. 4). La dépendance vis-à-vis de la température du coefficient Hall des cristaux de germanium utilisés sera étudiée en détail dans l'expérience UE6020200.



**DISPOSITIFS NECESSAIRES**

| Nombre                      | Appareil  | Référence  |
|-----------------------------|---|------------|
| 1                           | Ge non dopé sur plaque à circuit imprimé                            | 1008522    |
| 1                           | Appareil de base à effet Hall                                       | 1009934    |
| 1                           | Socle de serrage, 1000 g  | 1002834    |
| 1                           | Transformateur avec redresseur 3/ 6/ 9/ 12 V, 3 A (230 V, 50/60 Hz) | 1003316 ou |
|                             | Transformateur avec redresseur 3/ 6/ 9/ 12 V, 3 A (115 V, 50/60 Hz) | 1003315    |
| 1                           | Multimètre numérique P3340  | 1002785    |
| 1                           | Paire de cordons de sécurité, 75 cm                                 | 1002849    |
| 1                           | Paire de cordons de sécurité, 75cm, rouge/bleu                      | 1017718    |
| <b>En plus recommandé :</b> |   |            |
| 1                           | Ge dopé p sur plaque à circuit imprimé                              | 1009810    |
| 1                           | Ge dopé n sur plaque à circuit imprimé                              | 1009760    |
| 1                           | 3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)  | 1000540 ou |
|                             | 3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)  | 1000539    |
| 1                           | 3B NETlab™  | 1000544    |

**GENERALITES**

La conductivité électrique est une grandeur qui dépend fortement de la nature du matériau. Par conséquent, il est courant de classer les matériaux en fonction de leur conductivité électrique. On appelle semi-conducteurs les corps solides qui ne présentent une conductivité électrique mesurable qu'à température élevée. Cette dépendance de la température est due à la structure de bande des niveaux d'énergie électronique comportant une bande de valence, une bande conduction et une zone intermédiaire qui, dans le cas des semi-conducteurs purs non dopés, ne peut pas être occupée par des électrons.

À l'état initial, la bande de valence est la bande la plus fortement occupée par les électrons et la bande de conduction est la bande immédiatement supérieure inoccupée. L'énergie de gap  $E_g$  est la différence

d'énergie entre la bande de valence et celle de conduction, c'est une grandeur qui dépend de la nature du matériau. Pour le germanium, le gap est d'environ 0,7 eV. Au fur et à mesure que la température augmente, de plus en plus d'électrons sont agités thermiquement de la bande de valence vers la bande de conduction, provoquant des « trous » dans la bande de valence. Ces trous – appelés aussi électrons défectueux ou absences d'électrons – se comportent comme des particules de charge positive sous l'effet du champ magnétique  $E$  et contribuent autant que les électrons à la densité de courant :

$$(1) \quad j = \sigma \cdot E$$

$\sigma$  : conductivité électrique du matériau semi-conducteur (voir Fig. 1). Les électrons et les trous se déplacent à des vitesses moyennes différentes telles que

$$(2) \quad v_n = -\mu_n \cdot E \quad \text{et} \quad v_p = \mu_p \cdot E$$

$\mu_n$  : mobilité des électrons  
 $\mu_p$  : mobilité des trous

Cette conductivité électrique rendue possible par agitation des électrons de la bande de valence de conduction est ce qu'on appelle la conductivité intrinsèque.

Le nombre d'électrons dans la bande de conduction correspond dans l'équilibre thermique au nombre de trous dans la bande de valence. La densité de courant pour la concentration intrinsèque s'exprime alors comme suit :

$$(3) \quad j_i = -e \cdot n_i \cdot v_n + e \cdot n_i \cdot v_p = e \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p) \cdot E ;$$

c'est-à-dire que la conductivité intrinsèque est

$$(4) \quad \sigma_i = e \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p) ,$$

où la dépendance de la température de la concentration de porteurs  $n_i$  pour les électrons ou les trous s'écrit :

$$(5) \quad n_i = 2 \cdot \left( \frac{2\pi}{h^2} \cdot \sqrt{m_n m_p} \cdot kT \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

$$k = 8,617 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}} : \text{constante de Boltzmann,}$$

- $h$  : constante de Planck
- $m_n$  : masse effective des électrons
- $m_p$  : masse effective des trous
- $T$  : température de l'échantillon

Les mobilités  $\mu_n$  et  $\mu_p$  sont fonction de la température elles aussi. Dans la plage de température supérieure à la température ambiante, on a :

$$(6) \quad \mu \sim T^{-\frac{3}{2}}$$

Dans ce cas cependant, le terme dominant pour la dépendance vis-à-vis de la température est donné par la fonction exponentielle. C'est pourquoi la conductivité intrinsèque pour des températures plus élevées peut être représentée sous la forme suivante :

$$(7) \quad \sigma_i = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) .$$

Pour déterminer la conductivité du germanium pur non dopé, l'expérience consiste à envoyer un courant constant  $I$  à travers le cristal et à mesurer la baisse de tension en fonction de la température. À partir des données de mesure et sur la base de la relation

$$(8) \quad U = a \cdot E \quad \text{ou} \quad I = b \cdot c \cdot j$$

$a, b, c$  : dimensions des cristaux,

on calcule la conductivité électrique  $\sigma$  avec l'équation

$$(9) \quad \sigma = \frac{I}{U} \cdot \frac{a}{b \cdot c}$$

**EVALUATION**

L'équation (7) peut être réécrite sous la forme :

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2} \cdot \frac{1}{kT}$$

Par conséquent, on pose  $y = \ln \sigma$  en fonction de  $x = \frac{1}{kT}$  et on détermine l'énergie du gap  $E_g$  à partir de la pente de la droite résultante.

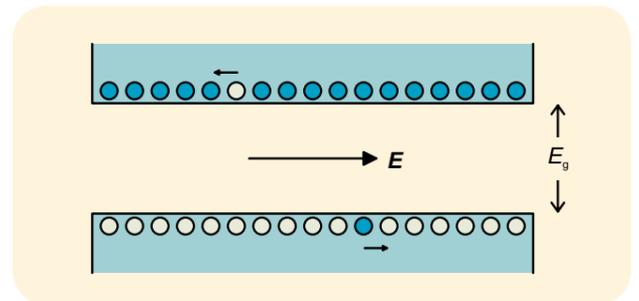


Fig. 1 Structure de bande du semi-conducteur avec un électron dans la bande de conduction et un trou dans la bande de valence qui se déplacent sous l'effet d'un champ électrique  $E$

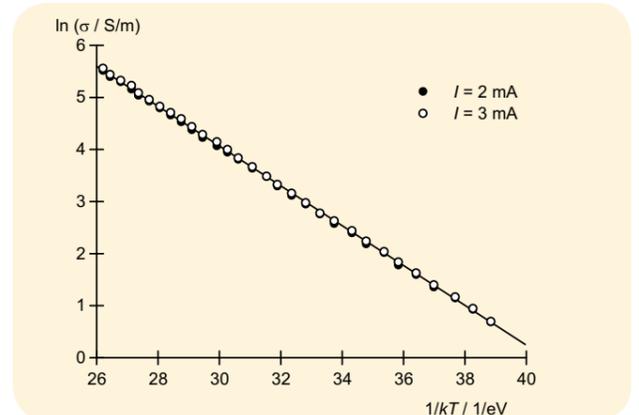


Fig. 3 Représentation pour déterminer l'écart de bande  $E_g$  dans le germanium

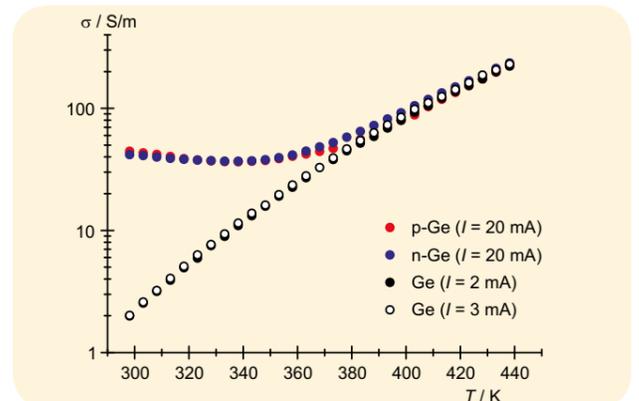


Fig. 4 Comparaison des conductivités du germanium et du germanium dopé



EXERCICES

- Démonstration de l'effet Hall dans le germanium dopé.
- Mesure de la tension de Hall en fonction du courant et du champ magnétique à température ambiante.
- Détermination du signe, de la densité et de la mobilité des porteurs de charge à température ambiante.
- Mesure de la tension Hall en fonction de la température d'échantillon.
- Détermination de la température d'inversion et distinction entre la conduction extrinsèque et intrinsèque avec le germanium dopé p.

NOTE

La dépendance de la conductivité électrique des cristaux de germanium utilisés vis-à-vis de la température est étudiée dans l'expérience UE6020100.



OBJECTIF

Étude des mécanismes de la conduction électrique dans le germanium dopé avec effet Hall

RESUME

L'effet Hall intervient dans des matériaux conducteurs se trouvant dans un champ magnétique B. Le signe de la tension de Hall change selon que le même courant I est porté par des porteurs de charge positifs ou négatifs. Leur valeur dépend de la densité des porteurs. C'est pourquoi l'effet Hall constitue un instrument important pour déterminer les mécanismes du transport de charge dans les semi-conducteurs dopés. Au cours de l'expérience, nous étudions des cristaux de germanium dopés à des températures variant entre 300 et 450 K, afin de distinguer la conduction électrique rendue possible par le dopage et la propre conduction rendue possible par l'activation thermique d'électrons de la bande de valence dans la bande de conduction.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre                      | Appareil  | Référence  |
|-----------------------------|---|------------|
| 1                           | Appareil de base à effet Hall                                       | 1009934    |
| 1                           | Ge dopé n sur plaque à circuit imprimé                              | 1009760    |
| 1                           | Ge dopé p sur plaque à circuit imprimé                              | 1009810    |
| 1                           | Capteur de champ magnétique ±2000 mT                                | 1009941    |
| 1                           | Bobine D à 600 spires   | 1000988    |
| 1                           | Noyau en U  | 1000979    |
| 1                           | Paire de cosses et étrier élastique pour effet Hall                 | 1009935    |
| 1                           | Transformateur avec redresseur 3/ 6/ 9/ 12 V, 3 A (230 V, 50/60 Hz) | 1003316 ou |
| 1                           | Transformateur avec redresseur 3/ 6/ 9/ 12 V, 3 A (115 V, 50/60 Hz) | 1003315    |
| 1                           | Alimentation CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)                 | 1003312 ou |
| 1                           | Alimentation CC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)                 | 1003311    |
| 1                           | Multimètre numérique P3340  | 1002785    |
| 1                           | 3B NETlog™ (230 V, 50/60 Hz)  | 1000540 ou |
| 1                           | 3B NETlog™ (115 V, 50/60 Hz)  | 1000539    |
| 1                           | Jeu de 15 cordons de sécurité, 75 cm                                | 1002843    |
| <b>En plus recommandé :</b> |   |            |
| 1                           | 3B NETlab™  | 1000544    |

GENERALITES

L'effet Hall intervient dans des matériaux conducteurs se trouvant dans un champ magnétique B. Il est causé par la force de Lorentz qui dévie les porteurs de charge participant au courant électrique I par un échantillon de matériau, perpendiculairement au champ magnétique et au sens du courant. La séparation des charges engendre un champ électrique E<sub>H</sub> perpendiculaire au sens du courant, qui est compensé par la force de Lorentz, et génère une tension de Hall U<sub>H</sub> dans l'échantillon. Le signe de la tension de hall change selon que le même courant I est porté par des porteurs de charge positifs ou négatifs. Leur valeur dépend de la densité des porteurs. C'est pourquoi l'effet Hall constitue un instrument important pour déterminer les mécanismes du transport de charge dans les matériaux conducteurs, souvent utilisé pour étudier les semi-conducteurs dopés.

Au cours de l'expérience, nous étudions des cristaux de germanium dopés à des températures variant entre 300 et 450 K. Les cristaux sont des échantillons plats de longueur a, de largeur b et d'épaisseur d, traversés dans le sens longitudinal par le courant I. Le champ magnétique B traverse l'échantillon perpendiculairement au courant. Il en résulte la tension de Hall

$$(1) \quad U_H = R_H \cdot \frac{B \cdot I}{d}$$

avec les coefficients de Hall

$$(2) \quad R_H = \frac{1}{e} \cdot \frac{n_p \cdot \mu_p^2 - n_n \cdot \mu_n^2}{(n_p \cdot \mu_p + n_n \cdot \mu_n)^2}$$

e = 1,602 · 10<sup>-19</sup> A.s: charge élémentaire

Les densités n<sub>n</sub> des électrons dans la bande de conduction et n<sub>p</sub> des trous dans la bande de valence ainsi que les mobilités μ<sub>n</sub> des électrons et μ<sub>p</sub> des trous sont des grandeurs du matériau qui dépendent de la température d'échantillon T.

En plus de la tension de Hall, l'expérience permet de mesurer la chute de tension U dans le sens longitudinal de l'échantillon, afin de déterminer la conductivité électrique

$$(3) \quad \sigma = e \cdot (n_n \cdot \mu_n + n_p \cdot \mu_p)$$

et la mobilité de Hall

$$(4) \quad \mu_H = R_H \cdot \sigma = \frac{n_p \cdot \mu_p^2 - n_n \cdot \mu_n^2}{n_p \cdot \mu_p + n_n \cdot \mu_n}$$

Les densités n<sub>n</sub> et n<sub>p</sub> des porteurs de charge sont influencées par le dopage, donc de l'intégration d'atomes étrangers dans le cristal. En cas de dopage p, des atomes accepteurs lient les électrons de la bande de valence et engendrent ainsi des « trous » dans celle-ci. En cas de dopage n, des atomes donneurs cèdent chacun un électron dans la bande de conduction. Les cristaux dopés sont électriquement neutres, les charges négatives et positives se compensent donc. Par conséquent,

$$(5) \quad n_n + n_A = n_p + n_D$$

n<sub>A</sub> : concentration des receveurs ; n<sub>D</sub> : concentration des donneurs  
En outre, n<sub>n</sub> et n<sub>p</sub> sont corrélés par une loi d'effet de masse, car, en cas d'équilibre dépendant de la température, il se forme à chaque unité de temps le même nombre de paires d'électrons et de trous qu'il ne s'en recombine. Dans ce cas :

$$(6) \quad n_n \cdot n_p = n_i^2$$

n<sub>i</sub> densité des porteurs de charge en cas de pure conduction propre (voir l'expérience UE6020100)

Au total, on a donc

$$(7) \quad n_n = \sqrt{n_i^2 + \frac{(n_A - n_D)^2}{4}} + \frac{n_D - n_A}{2}$$

$$(8) \quad n_p = \sqrt{n_i^2 + \frac{(n_A - n_D)^2}{4}} + \frac{n_A - n_D}{2}$$

À température ambiante, les concentrations n<sub>A</sub> et n<sub>D</sub> sont sensiblement supérieures à la densité des porteurs de charge en cas de pure conduction n<sub>i</sub>. Aussi

$$(9) \quad R_H = -\frac{1}{n_D \cdot e} \quad \mu_H = -\mu_n$$

pour dopage n et 300 K

$$(10) \quad R_H = \frac{1}{n_A \cdot e} \quad \mu_H = \mu_p$$

pour dopage p et 300 K

Le signe et la densité des porteurs de charge peuvent donc être déduits directement depuis les coefficients de Hall. La mobilité des porteurs de charge correspond à celle de Hall.

EVALUATION

Comme la quantité de porteurs de charge pour transporter le courant augmente au fur et à mesure que la température monte, la tension de Hall diminue, jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur zéro.

Pour le germanium dopé p, le signe de la tension de Hall change, car au fur et à mesure que la conduction propre augmente, l'influence des électrons, dont la propre mobilité μ<sub>n</sub> est supérieure, domine. Au-dessous de la température appelée d'inversion, c'est la conduction électrique rendue par le dopage qui domine, au-dessus de cette température, c'est la conduction propre qui domine.

À températures élevées, le cristal dopé n ne se distingue plus du cristal dopé p, car

$$n_n = n_p = n_i, \quad R_H = -\frac{1}{n_i \cdot e} \cdot \frac{\mu_n - \mu_p}{\mu_n + \mu_p}, \quad \mu_H = -(\mu_n - \mu_p)$$

La dépendance des mobilités μ<sub>n</sub> et μ<sub>p</sub> vis-à-vis de la température n'exerce aucune influence sur les coefficients de Hall, car pour les deux cas on a μ ∝ T<sup>-2</sup> (voir aussi l'expérience UE6020100)

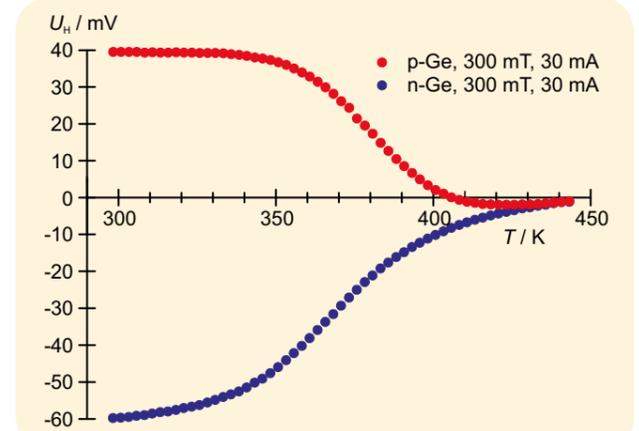


Fig. 4 Tension de Hall dans le germanium dopé p et n en fonction de la température T



**OBJECTIF**  
Enregistrer les caractéristiques de différents thermocouples et déterminer leur sensibilité

EXERCICES

- Mesurer la tension thermoélectrique  $U_{th}$  en fonction de la température  $T_1$  et confirmer le rapport linéaire pour trois thermocouples différents.
- Déterminer les sensibilités  $S$  résultant des diagrammes  $U_{th}(T_1)$ .
- Évaluer la température de référence  $T_2$  à partir des courbes de mesure.

RESUME

Dans un fil métallique dont les extrémités présentent différentes températures, le mouvement thermique rapide divergent des électrons aux extrémités chaude et froide entraîne un phénomène de diffusion thermique. Sous l'effet du courant de diffusion, l'extrémité froide se charge négativement par rapport à l'extrémité chaude. Une tension thermodiffusionnelle, proportionnelle à la différence de température entre les extrémités de fil, se forme entre les deux extrémités, avec le coefficient de Seebeck comme constante de proportionnalité. Lorsqu'on regroupe deux fils métalliques différents, dont les points de contact présentent différentes températures, il se forme un thermocouple si l'on place un voltmètre entre eux. Le voltmètre indique alors la tension thermoélectrique, qui est directement proportionnelle à la différence de température entre les points de contact. C'est ce que nous allons vérifier au cours de l'expérience pour trois paires de matériaux différents.

DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil   | Référence  |
|--------|--|------------|
| 1      | Jeu de 3 thermocouples                           | 1017904    |
| 1      | Thermomètre -20 – 110°C                          | 1003384    |
| 1      | Clip de fixation thermomètre                     | 1003528    |
| 1      | Jeu de 10 béchers, forme élevée                  | 1002873    |
| 1      | Agitateur magnétique chauffant (230 V, 50/60 Hz) | 1002807 ou |
|        | Agitateur magnétique chauffant (115 V, 50/60 Hz) | 1002806    |
| 1      | Microvoltmètre (230 V, 50/60 Hz)                 | 1001016 ou |
|        | Microvoltmètre (115 V, 50/60 Hz)                 | 1001015    |



GENERALITES

Un fil métallique dont les extrémités présentent différentes températures entraîne une diffusion thermique. Comme le mouvement thermique des électrons à l'extrémité chaude est plus rapide qu'à l'extrémité froide, le nombre d'électrons se déplaçant de l'extrémité chaude à l'extrémité froide est en moyenne plus grande qu'inversement. Dans notre cas de conduction d'électrons, ce courant de diffusion engendre une charge négative de l'extrémité froide par rapport à l'extrémité chaude et une tension thermodiffusionnelle entre les deux extrémités. Celle-ci s'oppose de plus en plus au mouvement des électrons, jusqu'à ce que plus aucun courant de diffusion ne passe.

La tension thermodiffusionnelle  $U_{td}$  est proportionnelle à la différence de température  $T_1 - T_2$  apparaissant entre les extrémités d'un fil avec, comme constante de proportionnalité, le coefficient de Seebeck  $k$  indépendant du matériau :

$$(1) \quad U_{td} = k \cdot (T_1 - T_2)$$

$U_{td}$  : tension thermodiffusionnelle,  
 $k$  : coefficient de Seebeck,  
 $T_1$  : température à l'extrémité chaude  
 $T_2$  : température à l'extrémité froide

Lorsqu'on regroupe deux fils métalliques différents, dont les points de contact présentent différentes températures, il se forme un courant thermoélectrique circulant. Le métal présentant la plus forte tension thermodiffusionnelle détermine le sens du courant. Cet agencement devient un thermocouple si l'on place un voltmètre entre eux. En raison de l'entrée à forte impédance, il ne passe pratiquement plus de courant et le voltmètre indique une tension thermoélectrique qui est directement proportionnelle à la différence de température entre les points de contact.

$$(2) \quad U_{th} = U_{td,B} - U_{td,A} = (k_B - k_A) \cdot (T_1 - T_2)$$

$U_{th}$  : tension thermoélectrique,  
 $U_{td,A}, U_{td,B}$  : tensions thermodiffusionnelles des métaux A et B  
 $k_A, k_B$  : coefficients de Seebeck des métaux A et B

Seule la différence

$$(3) \quad k_{BA} = k_B - k_A$$

des coefficients de Seebeck apparaissant dans l'équation (2) peut être mesurée sans problème. Elle correspond à la sensibilité

$$(4) \quad S = \frac{dU_{th}}{dT_1}$$

du thermocouple des métaux A et B. Aussi est-il convenu de choisir la platine (Pt) comme matériau de référence et d'indiquer les coefficients  $K_{APt}$ .

Dans l'expérience, nous allons déterminer les sensibilités  $S$  pour les trois paires de matériaux. Pour cela, on réchauffe de l'eau dans un bécher à une température  $T_1$  et on y plonge l'une des extrémités du thermocouple. Pour mesurer la tension, on branche l'autre extrémité du thermocouple à un microvoltmètre dont les prises d'entrée présentent la température constante  $T_2$ .

EVALUATION

La tension thermoélectrique pour les différents thermocouples est représentée dans un diagramme  $U_{th}(T_1)$  en fonction de la température, les droites sont adaptées aux courbes linéaires et les pentes de ces droites déterminent les sensibilités des thermocouples.

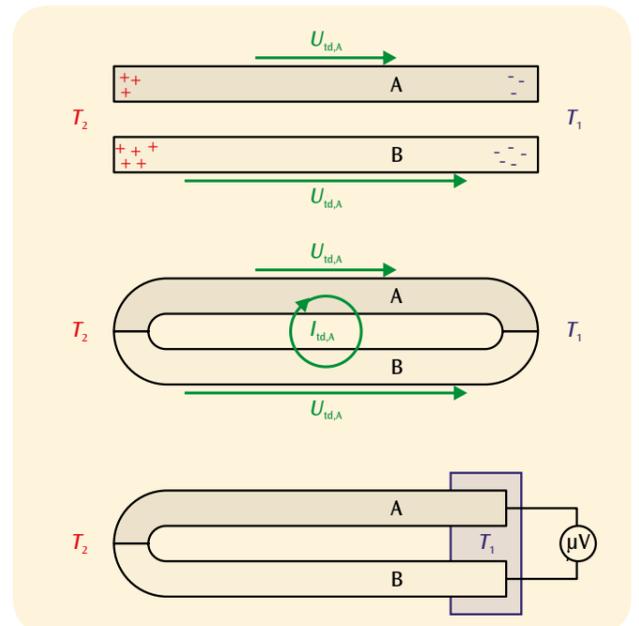


Fig. 1 Thermodiffusion dans des fils métalliques (en haut), courant thermoélectrique circulant (au centre) et tensions thermoélectriques dans une boucle constituée de deux fils métalliques différents (en bas)

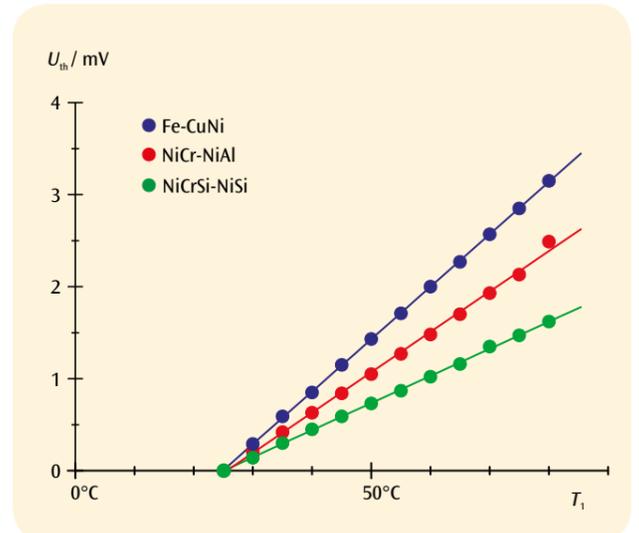


Fig. 2 Tensions thermoélectriques en fonction de la température pour des thermocouples du type Fe-CuNi, NiCr-NiAl et NiCrSi-NiSi. Les courbes de mesure coupent l'axe  $T_1$  du diagramme à la température de référence  $T_2 = 23^\circ\text{C}$

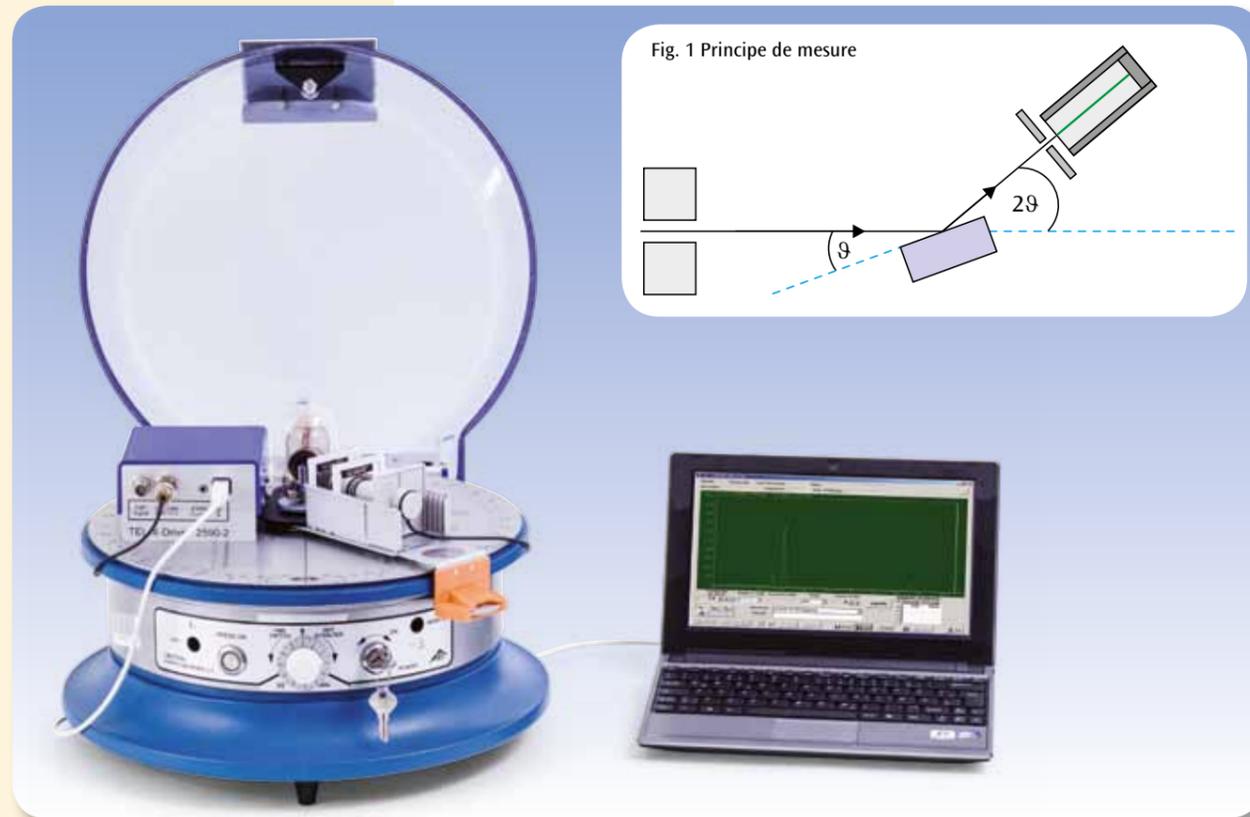


Fig. 1 Principe de mesure

## EXERCICES

- Enregistrer les spectres de diffraction du rayonnement X d'une anode de cuivre sur des cristaux de structure NaCl.
- Déterminer les constantes de réseau et comparer avec la taille des composants cristallins.

## OBJECTIF

Déterminer les constantes de réseau des cristaux à structure NaCl

## RESUME

La mesure de la réflexion de Bragg est une méthode d'analyse importante réalisée avec des rayons X sur des monocristaux. Le rayonnement X est réfléchi sur les plans réticulaires du cristal et les ondes partielles réfléchies aux différents plans interfèrent de façon constructive entre elles si la condition de Bragg est remplie. En connaissant la longueur d'onde du rayonnement X, on peut calculer les distances interréticulaires. L'expérience étudie et compare des cristaux de structure NaCl.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre | Appareil                              | Référence  |
|--------|---------------------------------------|------------|
| 1      | Appareil à rayons X (230 V, 50/60 Hz) | 1000657 ou |
|        | Appareil à rayons X (115 V, 50/60 Hz) | 1000660    |
| 1      | Kit de base Bragg                     | 1008508    |
| 1      | Accessoires de cristallographie       | 1000666    |
| 1      | Bragg Contrôle                        | 1012871    |

# 2

## GENERALITES

Une méthode d'étude importante sur des monocristaux à l'aide de rayons X remonte à H. W. et W. L. Bragg qui ont interprété l'agencement régulier des atomes ou des ions dans le cristal comme des plans réticulaires parallèles occupés par les composants du réseau. L'onde plane incidente du rayonnement X est réfléchi sur ces plans réticulaires, la longueur d'onde du rayonnement X restant inchangée.

Les sens de rayonnement perpendiculaires aux fronts d'ondes de l'onde incidente et de l'onde réfléchi remplissent la condition « angle d'incidence = angle de réflexion ». En outre, les ondes partielles réfléchies par les différents plans réticulaires interfèrent entre elles. L'interférence est constructive si le retard  $\Delta$  entre les ondes partielles représente un multiple entier de la longueur d'onde  $\lambda$ .

Le retard peut être calculé à l'aide de la Fig. 1. On obtient

$$(1) \quad \Delta = 2 \cdot d \cdot \sin \vartheta$$

$d$  : distance interréticulaire  
 $\vartheta$  : angle d'incidence / angle de réflexion

Aussi, la condition pour une interférence constructive est la suivante :

$$(2) \quad 2 \cdot d \cdot \sin \vartheta_n = n \cdot \lambda.$$

En utilisant donc un rayonnement X monochromatique de longueur d'onde connue, on peut déterminer la distance interréticulaire  $d$  en mesurant l'angle.

Dans la pratique, on tourne pour cela le monocristal dans un angle  $\vartheta$  par rapport au sens de l'incidence, tout en pivotant en même temps le tube Geiger-Müller dans un angle  $2\vartheta$  (voir Fig. 2). La condition (2) est très précisément remplie lorsque le tube enregistre l'intensité maximale.

L'expérience utilise le rayonnement X caractéristique d'un tube à rayons X équipé d'une anode en cuivre. En font partie le rayonnement  $K_\alpha$  de longueur d'onde  $\lambda = 154 \text{ pm}$  et le rayonnement  $K_\beta$  de longueur d'onde  $\lambda = 138 \text{ pm}$ . Un filtre Ni permet de masquer largement le rayonnement  $K_\beta$ , car le bord d'absorption du nickel se situe entre les deux longueurs d'onde mentionnées. En plus du rayonnement caractéristique, le tube à rayons X émet toujours un rayonnement de freinage d'une répartition spectrale continue. On l'observe dans les courbes de mesure comme un « arrière-plan » sous les pics du rayonnement caractéristique.

L'expérience étudie des monocristaux cubiques qui sont coupés parallèlement à la surface (100). C'est pourquoi il est facile d'identifier les plans réticulaires significatifs pour la réflexion de Bragg. Pour augmenter la précision de mesure, on mesure plusieurs ordres de diffraction.

On dispose d'un cristal LiF et d'un cristal NaCl. Des mesures complémentaires peuvent être réalisées sur un cristal KCl et sur un cristal RbCl. Tous présentent la même structure cristalline, dans laquelle deux types d'atome occupent en alternance les emplacements du réseau. Aussi, la distance interréticulaire  $d$  correspond à la demi-constante de réseau  $a$ .

## EVALUATION

En appliquant l'équation (2), on obtient l'équation suivante pour déterminer la constante de réseau recherchée :

$$a = 2 \cdot d = \lambda_{K\alpha} \cdot \frac{n}{\sin \vartheta_n}$$

Une comparaison entre les valeurs obtenues pour NaCl, KCl et RbCl montre que la constante de réseau est en corrélation avec la taille des ions alcalino-terreux. Les constantes de réseau de LiF et de NaCl se distinguent également, car les composants des cristaux présentent des tailles différentes.

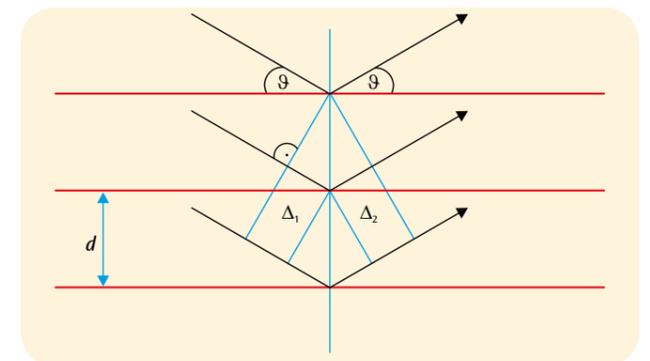


Fig. 2 Représentation pour dériver la condition de Bragg

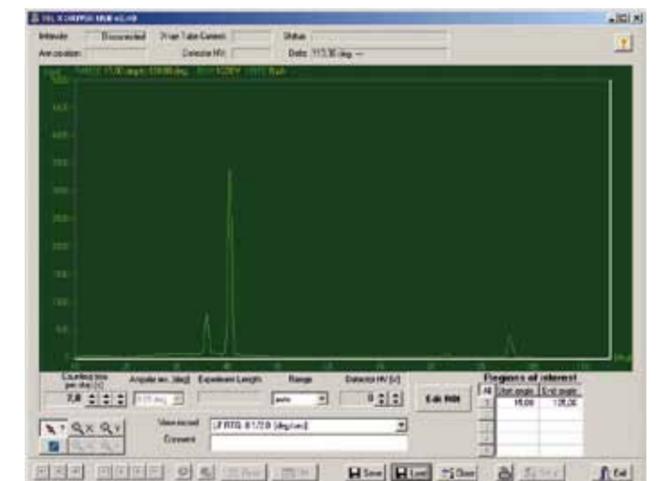


Fig. 3 Courbe de Bragg sur le NaCl

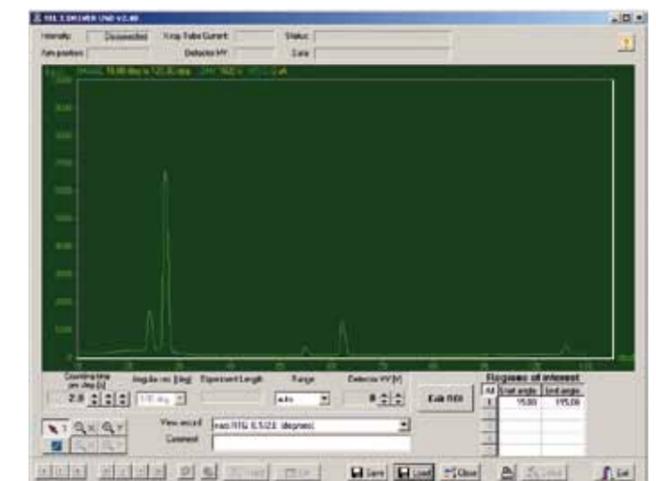
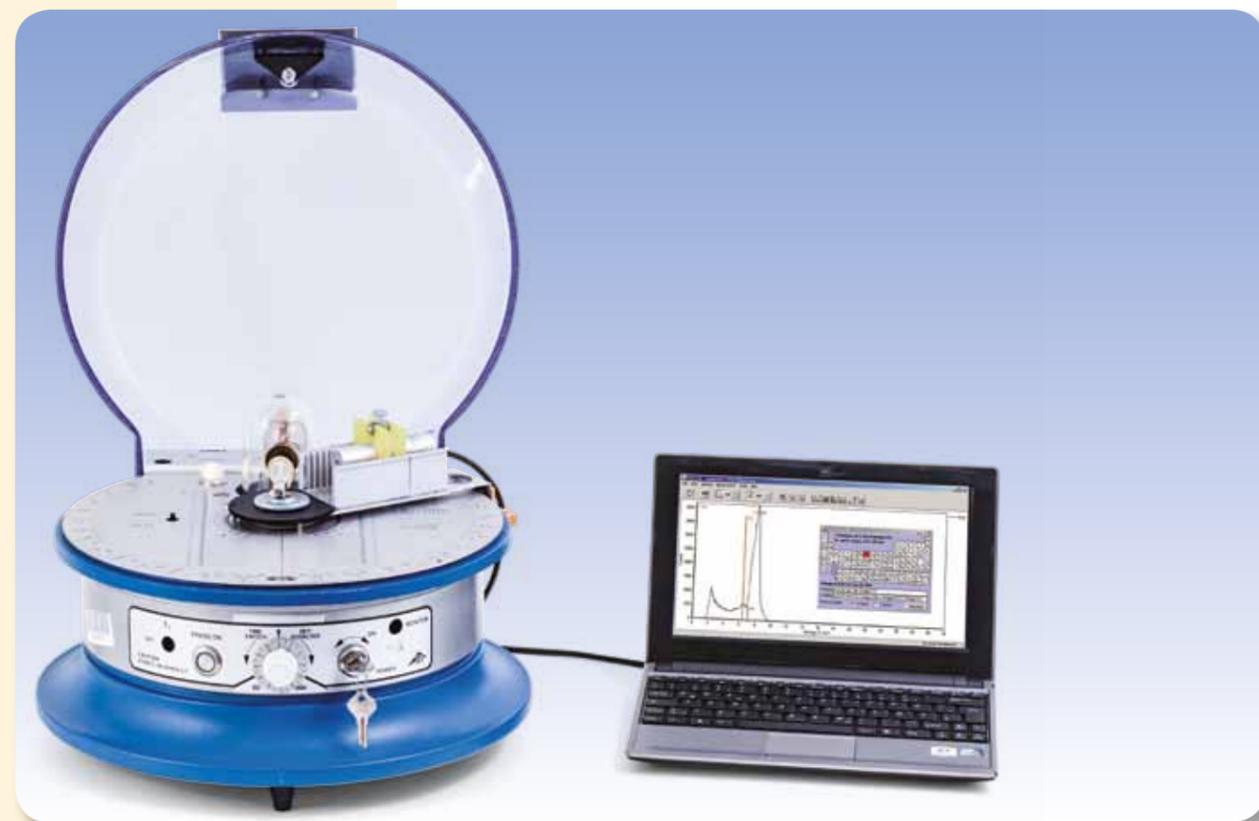


Fig. 4 Courbe de Bragg sur le LiF



Fig. 5 Cristal NaCl



## EXERCICES

- Enregistrer les spectres de fluorescence X de différents échantillons.
- Identifier les composants chimiques à l'aide des raies X caractéristiques.

## OBJECTIF

Analyse non destructive de la composition chimique

## RESUME

Les éléments chimiques peuvent être identifiés clairement à l'aide de leur rayonnement X caractéristique, car l'énergie du rayonnement dépend du numéro atomique de l'élément. On parle d'analyse de la fluorescence X lorsque le rayonnement X caractéristique est excité par l'irradiation du matériau étudié avec des quanta X hautement énergétiques. Dans l'expérience, nous allons analyser plusieurs échantillons en vue de leur composition chimique. Ainsi, nous allons comparer du fer forgé avec de l'acier inox, du cuivre avec du laiton et du bronze ainsi que différentes pièces de monnaie.

## DISPOSITIFS NECESSAIRES

| Nombre                      | Appareil                                | Référence  |
|-----------------------------|---|------------|
| 1                           | Appareil à rayons X (230 V, 50/60 Hz)   | 1000657 ou |
|                             | Appareil à rayons X (115 V, 50/60 Hz)   | 1000660    |
| 1                           | Kit de base Bragg                       | 1008508    |
| 1                           | Détecteur d'énergie de rayons X         | 1008629    |
| 1                           | Lot d'échantillons pour la fluorescence | 1012868    |
| <b>En plus recommandé :</b> |   |            |
|                             | Pièces de monnaie                       |            |



## GENERALITES

Les éléments chimiques peuvent être identifiés clairement à l'aide de leur rayonnement X caractéristique, car l'énergie du rayonnement dépend du numéro atomique de l'élément. Aussi, on peut déterminer la composition chimique d'un matériau en mesurant le rayonnement X caractéristique. Les liaisons chimiques des éléments n'ont aucune importance, car elles n'influencent pas les couches électroniques intérieures entre lesquelles transitent les rayons X.

On parle d'analyse de la fluorescence X lorsque le rayonnement X caractéristique est excité par l'irradiation du matériau étudié avec des quanta X hautement énergétiques. L'énergie d'excitation doit être supérieure à l'énergie du rayonnement caractéristique attendu, aussi les jonctions de la série K dans des éléments au numéro atomique élevé risquent-elles de ne pas être excitées. C'est pourquoi l'analyse doit également tenir compte de jonctions de la série L, voir Fig. 1.

Un détecteur d'énergie X est disponible dans l'expérience pour enregistrer les spectres d'énergie. Par son interaction avec les atomes de cristaux d'une photodiode PIN Si, le rayonnement X incident génère des paires de trous d'électrons dont la charge complète est proportionnelle à l'énergie X. La charge est convertie en une impulsion de tension dont la valeur proportionnelle à l'énergie X est transmise à un ordinateur sous forme de valeur numérique. Un logiciel d'évaluation représente la répartition des fréquences des amplitudes d'impulsions. Après une calibration de l'énergie, la répartition des fréquences représente le spectre d'énergie recherché. L'expérience utilise un tube à rayons X avec, comme source de rayonnement, une anode en cuivre. Nous allons analyser plusieurs échantillons en vue de leur composition chimique. Ainsi, nous allons comparer du fer forgé avec de l'acier inox, du cuivre avec du laiton et du bronze ainsi que différentes pièces de monnaie.

## EVALUATION

Le logiciel d'évaluation permet de comparer les énergies mesurées avec les valeurs théoriques trouvées dans la littérature pour le rayonnement caractéristique des éléments entrant en question.

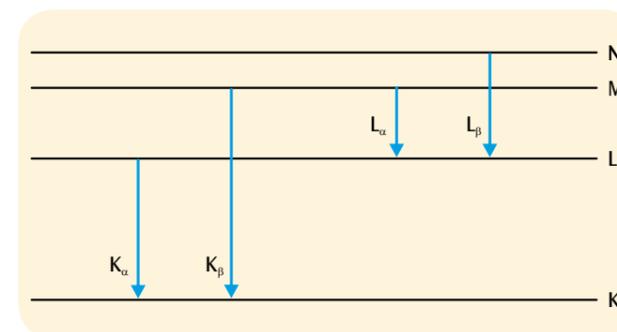


Fig. 1 Diagramme de Grotrian simplifié d'un atome avec les raies X caractéristiques

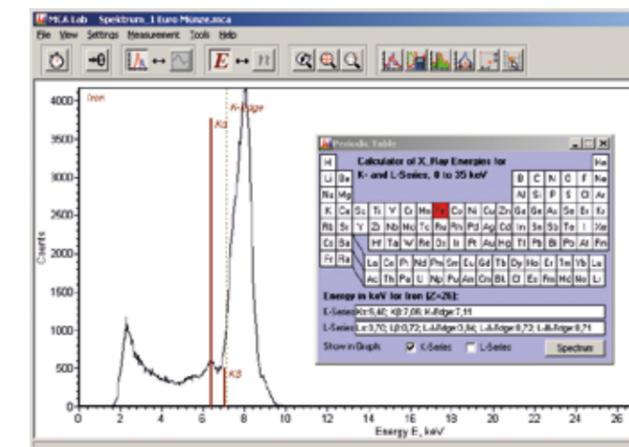


Fig. 2 Spectre de fluorescence X d'une pièce de 1 euro

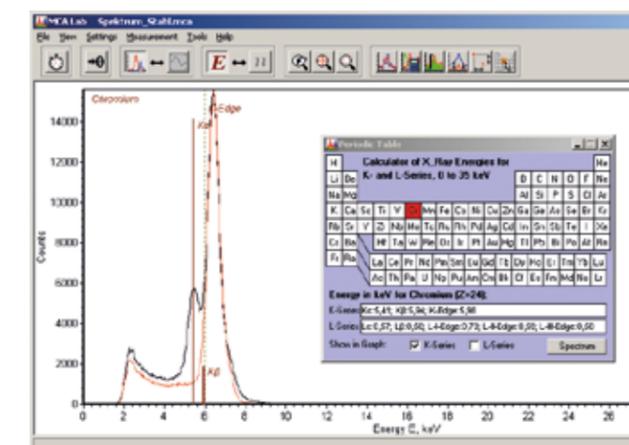


Fig. 3 Spectre de fluorescence X du fer forgé (rouge) et de l'acier inox (noir)

**SEE : SYSTÈME POUR L'EXPÉRIMENTATION ELÈVES**

**SEE ULTRASONS**

Jeu complet d'appareils permettant d'étudier les propriétés fondamentales des ondes en s'appuyant sur l'exemple des ultrasons de 40 kHz et appuyé par 30 protocoles expérimentaux. Présenté dans une boîte de rangement robuste avec insert en mousse de la forme des appareils et couvercle transparent. Contient également un CD avec les 30 expériences. Livré avec deux émetteurs d'ultrasons, une sonde microphonique très fine destinée à l'enregistrement et à l'analyse des oscillations à l'aide d'un oscilloscope standard et un stylo à ultrasons destiné à l'enregistrement de fronts d'onde au niveau du plan de table en tant que lignes de phase identique (isophases). De nombreuses expériences peuvent également être réalisées sans oscilloscope. Dans la plupart des cas, un voltmètre analogique destiné aux tensions alternatives avec une réponse en fréquence suffisante suffit pour mesurer l'amplitude des ultrasons.

**1016651** (230 V, 50/60 Hz)  
**1014529** (115 V, 50/60 Hz)

**Matériel fourni :**

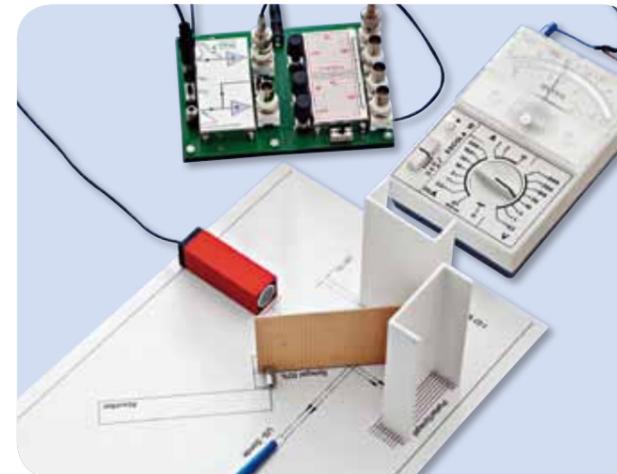
- 1 générateur d'ultrasons US
- 2 émetteurs d'ultrasons 40 kHz
- 1 stylo à ultrasons
- 1 support pour stylo à ultrasons
- 1 pied de support pour stylo à ultrasons
- 1 sonde à microphone
- 2 séparateurs de faisceaux
- 3 pièces de serrage pour séparateurs de faisceaux
- 1 lentille zonée
- 1 miroir concave
- 2 éléments latéraux pour fente double / réflecteurs
- 1 âme centrale pour fente double
- 1 pièce de serrage pour fente double
- 1 absorbeur d'ultrasons
- 2 cordons BNC, 1 m
- 1 cordons BNC, banane 4 mm
- 1 alimentation secteur

**CD avec protocoles expérimentaux fourni**

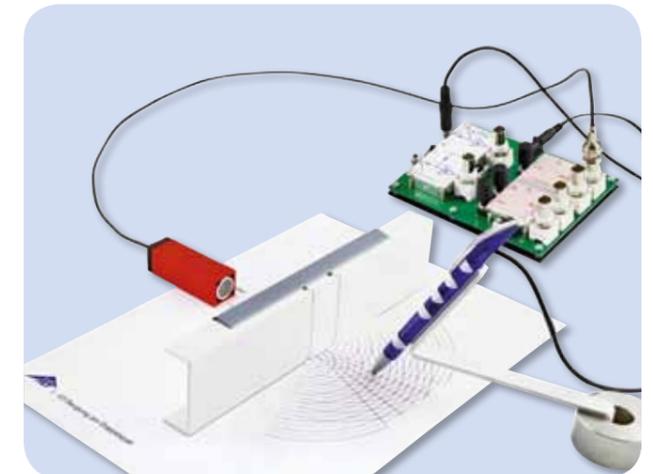


**Comprend 30 protocoles expérimentaux sur les ultrasons**

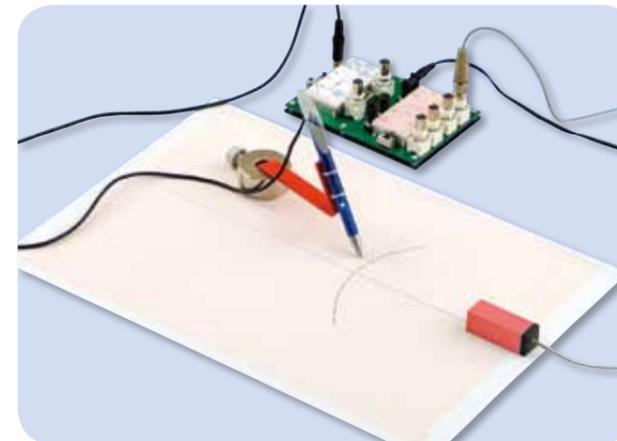
- Représentation d'oscillations acoustiques sur l'oscilloscope \*)
- Rapport entre les oscillations et les ondes \*)
- Comparaison des oscillations en deux points d'une onde \*)
- Analyse des rapports entre les phases avec le stylo à ultrasons \*)
- Détermination de la longueur d'onde et de la vitesse du son
- Relation entre vitesse du son et température
- Caractéristique d'émission des émetteurs d'ultrasons \*\*)
- Courbe de résonance du transducteur d'ultrasons \*)
- Transmission et réflexion d'ultrasons \*\*)
- Absorption d'ultrasons \*\*)
- Superposition d'oscillations sinusoïdales \*)
- Amplification et extinction lors de la superposition d'oscillations sinusoïdales \*)
- Enregistrement de fronts d'onde avec le stylo à ultrasons \*)
- Génération et démonstration de fronts d'onde rectilignes
- Diffraction d'ultrasons sur une arête
- Diffraction d'ultrasons sur la fente simple
- Interférence de deux rayons \*\*)
- Loi de réciprocité pour l'interférence de deux rayons \*\*)
- Diffraction sur la fente double \*\*)
- Relations entre les phases lors de la diffraction sur la fente double I \*)
- Relations entre les phases lors de la diffraction sur la fente double II \*\*)
- Illustration avec un miroir concave sphérique \*\*)
- Construction des zones de Fresnel \*\*)
- Illustrations avec une lentille zonée \*\*)
- Interférence d'ultrasons sur un miroir de Lloyd \*\*)
- Montage d'un interféromètre simple \*\*)
- Montage d'un interféromètre de Michelson \*\*)
- Suppression de l'interférence par l'interruption d'une trajectoire \*)
- Génération d'ultrasons stationnaires \*\*)
- Battement avec ultrasons \*)
- Effet Doppler avec ultrasons



Interféromètre de Michelson



Diffraction sur la fente double

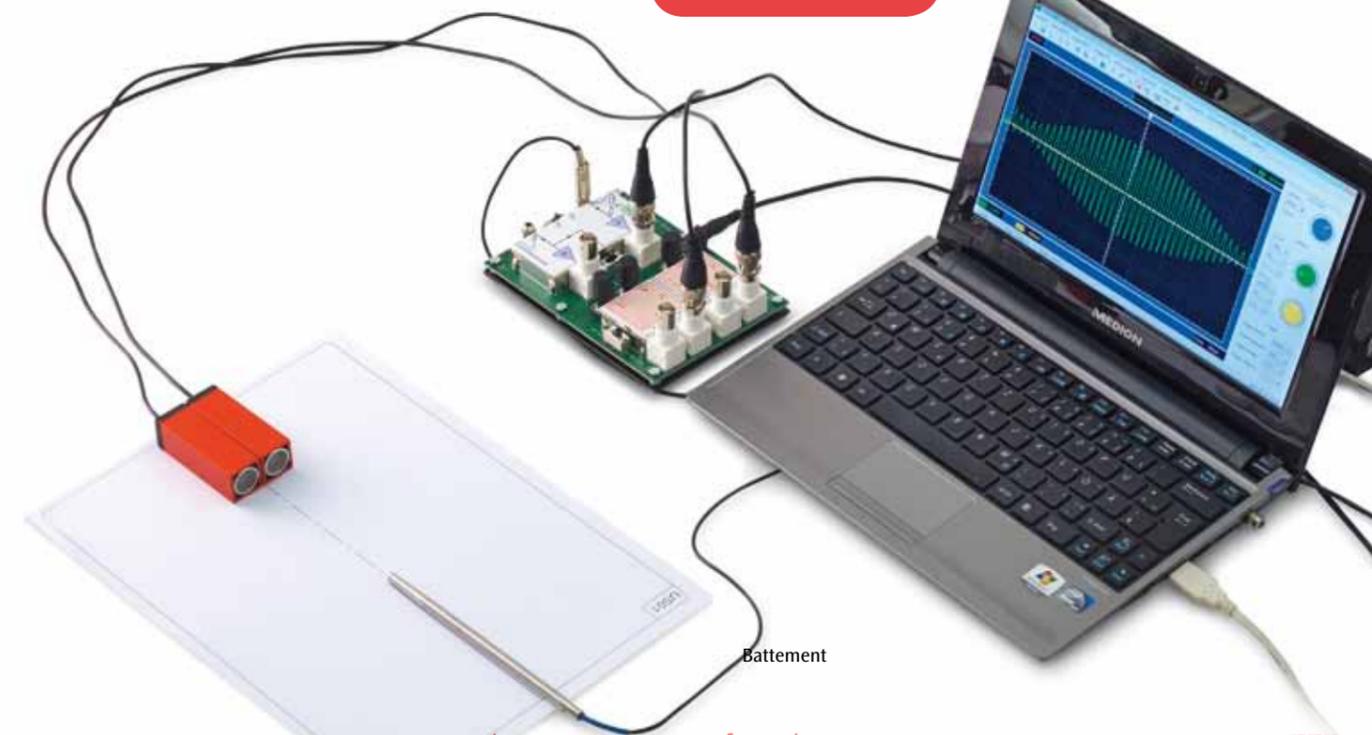


Enregistrement de fronts d'onde

Équipement supplémentaire requis :  
**1017264 Oscilloscope à deux canaux**  
 (pour expériences marquées d'un \*)

**1006811 Instrument de mesure multiple ESCOLA 2**  
 (pour expériences marquées de deux \*\*)

**Renseignez-vous sur nos remises à compter de 8 unités.**



Battement

...going one step further

## OPTIQUE K, UN SYSTÈME AYANT SES ADEPTES !

### KIT DE BASE « OPTIQUE K »

Depuis de nombreuses années sa grande fiabilité et sa précision, en ont fait un outil indispensable à la réalisation d'exercices et de travaux pratiques d'optique.

Les expériences sont exécutées avec la lumière blanche d'une lampe à incandescence dont le filament est spiralé. Tous les composants optiques K sont montés sur des supports plans sans tige (assurant ainsi un parallélisme automatique des composants) et peuvent être déplacés facilement sur le banc par le biais de cavaliers supports.

#### L'ensemble comprend :

- 1 lampe optique K
- 1 transformateur 12 V, 25 VA
- 1 banc d'optique K, 1000 mm
- 6 patins optiques K
- 2 fixations K
- 2 lentilles convexes K,  $f = 50$  mm
- 2 lentilles convexes K,  $f = 100$  mm
- 2 lentilles convexes K,  $f = 150$  mm
- 1 lentille convexe K,  $f = 300$  mm
- 1 lentille convexe K,  $f = 500$  mm
- 1 lentille concave K,  $f = -100$  mm
- 1 lentille concave K,  $f = -500$  mm
- 1 diaphragme à une fente
- 1 diaphragme à 3 fentes
- 1 photo dans un cadre de diapositive
- 1 écran transparent
- 1 écran blanc
- 1 jeu de 4 filtres colorés
- 1 échelle graduée, 15 mm
- 1 « 1 » perlé (objet dissymétrique)
- 1 diaphragme perforé  $d = 1$  mm
- 1 diaphragme perforé  $d = 6$  mm
- 1009932** (230 V, 50/60 Hz)
- 1009931** (115 V, 50/60 Hz)

**CD-ROM**  
contenant les  
protocoles  
expérimentaux  
détaillés.



### OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE :

- Chambre noire à sténopé
- Image formée par une lentille convexe
- Anomalies de la vision
- Image produite par l'œil (modèle d'œil)
- Correction de l'amétropie
- Loupe
- Microscope
- Lunette astronomique
- Lunette terrestre
- Projecteur de diapositives

#### Équipement nécessaire pour « Optique géométrique » :

- 1009932** Kit de base « Optique K » (230 V, 50/60 Hz)
- ou
- 1009931** Kit de base « Optique K » (115 V, 50/60 Hz)



### POLARISATION

- Polarisation d'ondes transversales
- Polariseur et analyseur
- Observation de la lumière polarisée dans l'eau trouble
- Réfraction double
- Rotation du plan de polarisation dans une solution sucrée

#### Équipement « Polarisation » :

- 1009932** Kit de base « Optique K » (230 V, 50/60 Hz)
- ou
- 1009931** Kit de base « Optique K » (115 V, 50/60 Hz)
- 1009701** Équipement complémentaire « Polarisation »

#### Équipement complémentaire « Polarisation »

Équipement complémentaire au kit de base « Optique K » (1009701 ou 1009931) permettant la réalisation d'expériences par les élèves sur le thème de la polarisation d'ondes lumineuses.

#### L'ensemble comprend :

- 1 paire de filtres de polarisation K
- 1 diaphragme d'ouverture 10 mm
- 1 cuvette rectangulaire
- 1009701**



### INTERFÉRENCE :

- Miroir de Fresnel
- Diffraction sur de petites ouvertures et disques
- Diffraction par une fente simple
- Diffraction sur un fil métallique
- Diffraction sur fentes multiples
- Diffraction sur réseau
- Résolution optique
- Détermination de la longueur d'onde de la lumière

#### Équipement « Interférence » :

- 1009932** Kit de base « Optique K » (230 V, 50/60 Hz)
- ou
- 1009931** Kit de base « Optique K » (115 V, 50/60 Hz)
- 1009700** Équipement complémentaire « Interférence »

2m



#### Équipement complémentaire « Interférence »

Équipement complémentaire au kit de base « Optique K » (1009932 ou 1009931) permettant la réalisation d'expériences par les élèves sur le thème de l'interférence d'ondes lumineuses.

#### L'ensemble comprend :

- 1 banc d'optique K, 500 mm
- 1 fente réglable K
- 1 diaphragme à 9 disques
- 1 diaphragme à 9 trous
- 1 diaphragme avec 3 fentes simples et 1 fente double
- 1 diaphragme avec 4 fentes multiples et réseau
- 1 diaphragme à 3 réseaux à traits
- 1 vis micrométrique K
- 1 miroir de Fresnel K
- 1009700**

**Renseignez-vous**  
sur nos remises  
à compter de  
8 unités.



**Kit extraction de l'ADN de l'oignon**

Grâce à cette expérience simple de biologie cellulaire et de génétique, vous pouvez relativement vite isoler au cours d'une heure académique de l'ADN chromosomal d'un oignon. A travers cela, vos élèves peuvent prendre connaissance d'un processus de base de l'extraction de l'ADN. Tout est contenu dans ce set permettant de travailler en 5 groupes. Une expérimentation de classe efficace avec un grand rendement en ADN qui éveillera quelques vocations à vos élèves.

**Contenu de la livraison pour 15 essais :**

80 ml de concentré lytique, 500 mg de mélange de protéases, 15 tubes à fond plat, 15 filtres ronds en papier, 5 entonnoirs, 15 bâtonnets de bois, instruction d'expérimentation (en plusieurs langues).

Dimensions : 20,5x20,5x10,5 cm

Poids : 534 g

D/E/F/S/J/R

1010264



**Microscope monoculaire OPTI 1, modèle 300 (230 V, 50/60 Hz)**

Le microscope 300 satisfait à toutes les contraintes qu'impose un cours de biologie exigeant. Ce microscope se distingue par une manipulation simple et une bonne qualité mécanique et optique. Il est équipé d'une platine, d'une tourelle porte-objectifs avec 4 objectifs achromatiques selon la norme DIN (4x, 10x, 40x, 100x) et d'un condenseur d'Abbe.

1003271



**Trousse à dissection (4 pièces)**

Jeu de 4 instruments en inox dans une trousse en vinyle:

- 1 paire de ciseaux fins, 10 cm
- 1 pince fine, 13 cm
- 1 aiguille droite, 13,5 cm, manche plastique
- 1 manche de scalpel no 4
- 1 jeu de 5 lames de scalpel no 11

18x8x3 cm, 0,15 kg

1008710



**La cellule végétale**

(agrandie environ 500 000 à 1 000 000 fois)

Ce modèle en deux parties illustre la structure d'une cellule végétale typique avec son cytoplasme et ses organelles cellulaires, observés au microscope électronique. Dans le but d'une meilleure compréhension, tous les organelles importants sont représentés en relief et colorés différemment, entre autres :

- paroi cellulaire
- membrane cellulaire
- noyau cellulaire
- réticulum endoplasmique lisse
- réticulum endoplasmique rugueux
- ribosomes
- chloroplastes
- mitochondries
- dictyosomes/appareil de Golgi

20x14x32 cm; 0,8 kg

1000524



**Modèle moléculaire 22 paires de base miniADN™**

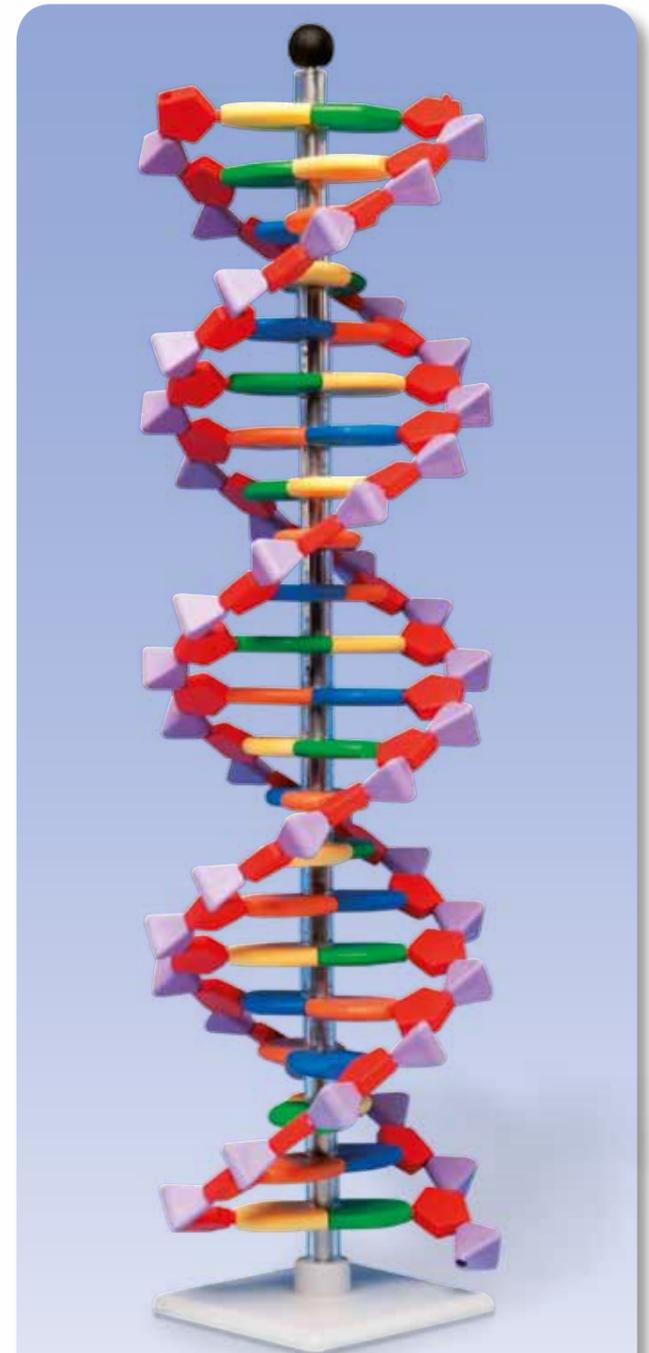
Le système miniADN™ comprend des pièces codées de couleur à forme abstraite pour représenter les bases azotées et les éléments de sucre pentagonaux et de phosphate pyramidaux pour faire le modèle à double hélice de l'ADN.

Contenu : 11 Thymine (orange), 11 Adénine (bleu), 11 Guanine (vert), 11 Cytosine (jaune), 44 Désoxyribose (rouge), 44 Phosphate (violet)

Accompagné des instructions de montage et de support propre. Emballé dans une boîte en plastique.

H. 44cm ; diam. 11 cm, E

1005296



**MODÈLES POUR L'ENSEIGNEMENT DE LA BIOLOGIE**

**Cycle de vie de l'abeille – Apis cerana**  
 La longueur des abeilles est d'environ 10 mm, elles présentent des rayures orange et noires ainsi que de nombreux poils tirant sur le jaune. Elles possèdent des aiguillons empoisonnés avec lesquels elles piquent leurs ennemis. Les abeilles vivent en colonies avec une reine qui pond des œufs et des milliers d'ouvrières. Il n'y a que quelques mâles. Les abeilles transportent le pollen de fleur en fleur, aidant ainsi les plantes à se reproduire. Elles fabriquent aussi du miel à partir du nectar de fleur. Les abeilles vivent dans des ruches où le miel est stocké et où vivent les larves.  
 21x12x3 cm; 0,6 kg  
**1005971**



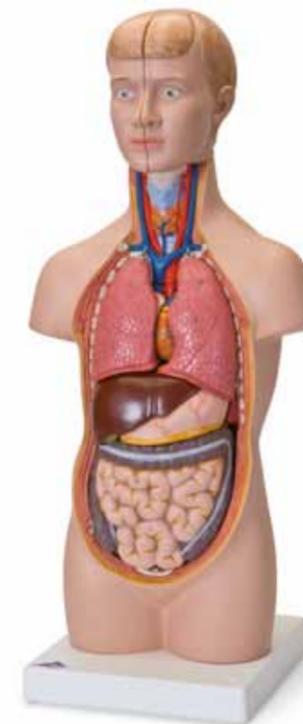
**Fleur de cerisier avec fruit (Prunus avium)**  
 Ce modèle montre la fleur de guignier (en 3 parties) agrandie 7 fois, ainsi qu'un fruit de cerisier agrandi 3 fois. La fleur de cerisier peut être désassemblée en 2 moitiés, ce qui permet d'apercevoir l'ovaire (détachable) avec le style et le stigmate. Sur socle.  
 32,5 cm; 0,6 kg  
**1000530**

*peint à la main  
d'après nature!*



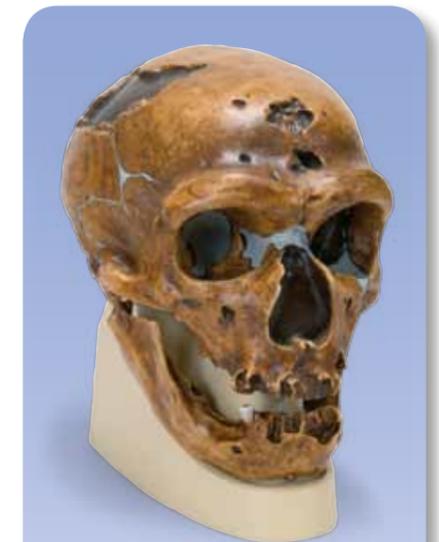
**Salamandre terrestre (Salamandra salamandra)**  
 Une salamandre qui enthousiasme surtout les plus jeunes élèves. Les couleurs de notre salamandre sont imitées à s'y méprendre et ses caractéristiques typiques sont clairement visibles. C'est un modèle grandeur nature sur fond naturel.  
**1001267**

**Œil, agrandi 5 fois, en 6 parties**  
 Ce modèle se décompose comme suit :  
 • les deux moitiés de la sclère avec cornée et insertions du muscle de l'œil  
 • les deux moitiés de la choroïde avec iris et rétine  
 • le cristallin le corps vitré  
 Monté sur socle.  
 9x9x15 cm ; 0,1 kg  
 L/E/D/S/F/P/I/J  
**1000259**



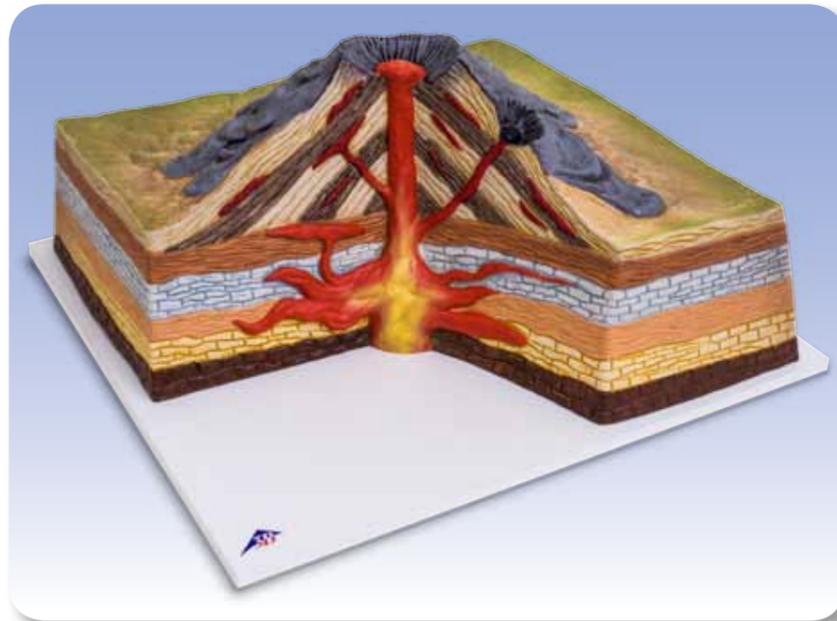
**Torse miniature, en 12 parties**  
 Ce torse 3B Scientific® à l'échelle 1/2 convient parfaitement à l'enseignement des plus jeunes. Même des mains non-averties pourront facilement démonter les parties suivantes :  
 2 moitiés de tête  
 2 moitiés de cerveau  
 2 poumons  
 cœur en 2 parties  
 estomac  
 foie avec vésicule biliaire  
 intestins en 2 parties  
 54x24x18 cm ; 1,89 kg  
**1000195**

**Équilibrage de pression dans l'oreille médiane**  
 Ce modèle fonctionnel illustre le mécanisme d'équilibrage de pression de l'oreille médiane par la trompe d'Eustache. Il permet de représenter le bombement ou le creusement du tympan et l'équilibrage de pression consécutif. Livraison avec membrane de rechange et descriptif pour l'enseignant en anglais et allemand. 16x13x12 cm, 0,2 kg, D/E  
**1012829**



**Paléanthropologie – Crâne de l'homme de la Chapelle-aux-Saints**  
 Moulé à partir de la reconstitution du crâne de La Chapelle-aux-Saints, ce modèle élaboré avec une grande précision représente le crâne d'un ancien Homme du Néanderthal européen de 50 à 55 ans, l'Homme (sapiens) néanderthalensis. Représentant de l'Homo sapiens archaïque. Lieu de sa découverte : au Sud de la France. Date de la découverte : 1908 ; âgé de : probablement 35 000 à 45 000 années.  
 22x16x22,5 cm; 0,9 kg  
 L/D/E/F/P/S/I/J  
**1001294**

## TECTONIQUE DES PLAQUES ET VOLCANISME



### Stratovolcan

Ce modèle peint à la main illustre par une coupe le parcours du magma liquide du centre vers l'extérieur de la terre.

Matériau : PVC  
Dimensions : 47 x 35 x 19 cm  
Poids : 2,40 kg  
**1017595**



### Ensemble de trois pierres volcaniques

Ensemble de trois pierres volcaniques, composé de trois sachets contenant chacun dix pierres de la taille d'une noix : lave, obsidienne et pierre ponce.

**1018462**

### Dorsale médio-atlantique

Ce modèle illustre en trois dimensions la forme en S des montagnes volcaniques créée par la tectonique des plaques dans l'Océan Atlantique.

Echelle à l'équateur : 1/32x106  
Matériau : PVC  
Dimensions : 64 x 48 x 8 cm  
Poids : 6,5 kg  
**1017594**



## PIERRES DIVERSES



### COLLECTION DE 24 PIERRES

Les collections contiennent 24 spécimens courants de différents groupes de pierres et minéraux. Les spécimens contenus mesurent environ 3x3x3 cm<sup>3</sup> à 5x5x5 cm<sup>3</sup> et sont vendus dans une boîte d'assortiment robuste avec numérotation, désignation et livret d'accompagnement.



### Collection de 24 pierres et minéraux volcaniques

La collection comprend :

**Des roches éruptives** : basalte, phonolite, rhyolite, rhyolite

**Lave** : lave du Vésuve, lave basaltique et lave rhyolitique

**Pyroclastes** : lapilli, cendre volcanique, pierre ponce

**Minéraux** : anorthite, anorthoclase, augite, cristobalite, cristaux de Hauyn, leucite, natrolite, néphéline, pickeringite, sanidine, soufre, thau-masite, tridymite, obsidienne

**1018442**

### Collection de 24 pierres

La collection contient des spécimens courants de pierres métamorphiques sédimentaires et magmatiques et des spécimens importants de roches industrielles :

**des pierres magmatiques, plutoniques** : foyaïte, gabbro, granit, granodiorte, larvikite et monzonite

**Roches magmatiques, vulcanites** : basalte, pierre ponce, phonolite, rhyolite

**Roches sédimentaires** : brèche, dolomite, gypse, calcaire, craie, quartzite et grès

**Roches métamorphiques** : amphibolite, éclo-gite, micaschiste, gneiss, marbre, phyllite et serpentinite

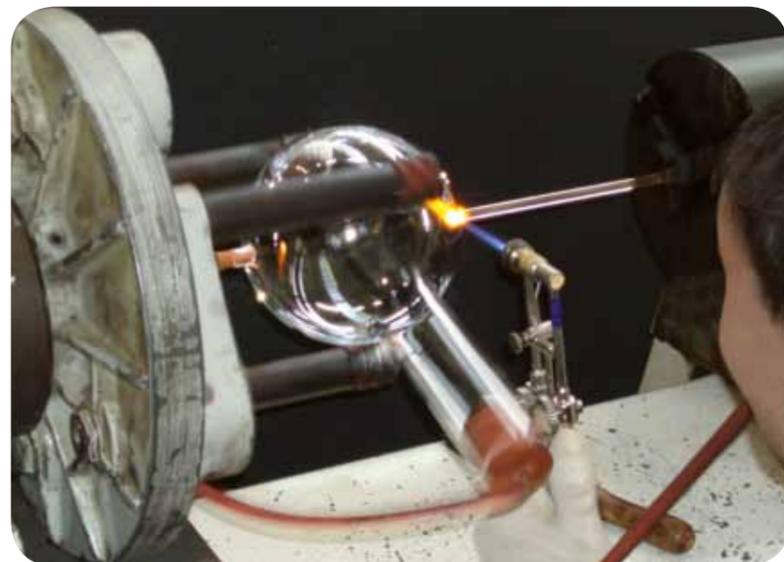
**1018443**

### Collection de 24 minéraux

La collection contient des spécimens des dix classes de matériaux : éléments, sulfures, halogénures, oxydes, carbonates, borates, sulfate, silicates, phosphates et composés organiques :

1. **des éléments** : graphite et soufre
  2. **des sulfures** : bournonite, galénite et pyrite
  3. **des halogénures** : fluorite et halite
  4. **des oxydes** : hématite, quartz et rutile
  5. **des carbonates** : calcite et dolomite
  6. **des borates** : ludwigite
  7. **des sulfates** : baryte, célestine et gypse
  8. **des phosphates, arsenates et vanadates** : apatite et vanadite
  9. **des silicates et germanates** : actinolite, amazonite, muscovite, sodalite et talc
  10. **des composés organiques** : copal
- 1018444**

## LA PRODUCTION 3B SCIENTIFIC PHYSIQUE EN ALLEMAGNE (KLINGENTHAL)



### Fabrication d'un tube à électrons TELTRON® chez 3B Scientific

Il n'existe au monde que quelques rares sites spécialisés dans la fabrication de tubes à électrons. Seuls des spécialistes hautement qualifiés, et bénéficiant de l'expérience nécessaire, maîtrisent la technicité adéquate à la construction des tubes à électrons TELTRON® en vous apportant une qualité toujours irréprochable.



### Fabrication de composants au centre de traitement CNC Klingenthal

Les célèbres instruments didactiques sont le mélange d'une technique de fabrication ultramoderne et d'une longue tradition artisanale. Le traitement CNC du site de Klingenthal permet une parfaite précision mécanique pour la réalisation en série d'appareils de qualité, à des prix très compétitifs.



### Poste de travail CAO/FAO à Klingenthal

La commande FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) de la fraiseuse plate est directement générée par le programme de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Ainsi même des projets sur mesure pour de petites séries sont économiquement viables. Ils peuvent être réalisés rapidement et avec la même précision.

## EVOLUTION DE 3B SCIENTIFIC



Le groupe international 3B Scientific est le premier fabricant mondial, et le plus expérimenté, d'outils anatomiques didactiques. L'usine la plus ancienne a démarré sa production dès 1819 à Budapest, en Hongrie. Le succès toujours croissant de 3B Scientific est le résultat d'une expansion globale, basée sur la fabrication et la vente d'outils didactiques, à caractère médical et scientifique, de haute qualité et à des prix compétitifs. 3B Scientific®, la marque déposée à l'échelle internationale, est représentée dans plus de 100 pays du globe dans les domaines de la science, de la formation médicale et de l'information des patients. La gamme de produits comprend des squelettes, des colonnes vertébrales, des organes, des torses artificiels, des planches murales didactiques, des simulateurs médicaux, des logiciels ainsi que des produits pour l'enseignement de la biologie et de la physique. L'excellente qualité du service, des produits et des processus d'organisation est certifiée par la norme ISO 9001: 2008. Cette étape officielle de la gestion de la qualité souligne le processus continu d'innovation, de perfectionnement des produits et d'orientation client, associés à la marque 3B Scientific®.



- 1819 Fondation de Calderoni à Budapest, Hongrie
- 1912 Fondation des ateliers DHM à Dresde, Allemagne
- 1948 Fondation de la société Paul Binhold Lehrmittelfabrik à Hambourg, Allemagne
- 1950 Fabrication du premier squelette synthétique
- 1952 Inauguration de la première usine de squelettes
- 1963 Nouveau siège social à Hambourg
- 1965 Introduction de la gamme des torses
- 1970 Introduction du logo de la société Binhold
- 1979 Exportation de modèles anatomiques vers les Etats-Unis
- 1983 Fabrication de pièces d'ostéologie par moulage et injection thermoplastique
- 1986 Elargissement de la gamme aux simulateurs de soins
- 1988 Exportation de modèles anatomiques vers le Japon
- 1991 Acquisition de la société DHM Lehrmittelfabrik GmbH à Dresde, Allemagne
- 1993 Acquisition de la société Calderoni et fondation de la société Biocalderoni, Hongrie
- 1995 Fondation de la société American 3B Scientific à Atlanta, USA
- 1996 Nouveau logo du groupe 3B Scientific
- 1997 Fondation de la société Nihon 3B Scientific à Niigata, Japon
- 1998 Fondation de la société France 3B Scientific à Bartenheim, France
- 1998 Fusion de la société Paul Binhold Lehrmittelfabrik et de la société DHM Lehrmittelfabrik pour former la société 3B Scientific GmbH
- 1999 Fondation de la société China 3B Scientific à Suzhou, Chine
- 2000 Certification ISO 9001
- 2001 Introduction du vaste assortiment de physique dans la gamme 3B Scientific®
- 2002 Fondation de la société Italie 3B Scientific à Bologna, Italie
- 2003 Fondation de la société España 3B Scientific à Valencia, Espagne
- 2003 Fondation de la société UK 3B Scientific à Weston-super-Mare, Grande Bretagne
- 2004 Distribution exclusive des aiguilles d'acupuncture SEIRIN® en Europe
- 2005 Fondation de Russia 3B Scientific à Saint-Petersbourg, Russie
- 2006 Fondation de Brasil 3B Scientific à Joinville, Brésil
- 2007 Fondation de Thai 3B Scientific à Bangkok, Thaïlande
- 2009 Certification ISO 9001 : 2008
- 2011 Introduction du progiciel de gestion d'entreprises SAP
- 2012 Fondation de 3B Scientific Korea à Yongin, Corée du Sud
- 2012 Fondation de 3B Scientific TR, à Istanbul, Turquie



## EXPÉRIENCE DE FRANCK ET HERTZ

La quantification de l'énergie ainsi que la génération, l'enregistrement et l'évaluation de spectres et la confirmation expérimentale de modèles font partie intégrante de la plupart des curricula du monde entier. La fameuse expérience de *James Franck* et *Gustav Hertz* de 1913 revêt une signification fondamentale pour la démonstration d'états discrets des atomes d'énergie.