

LEYBOLD®



CATALOGUE GENERAL D'EXPERIENCE EN PHYSIQUE

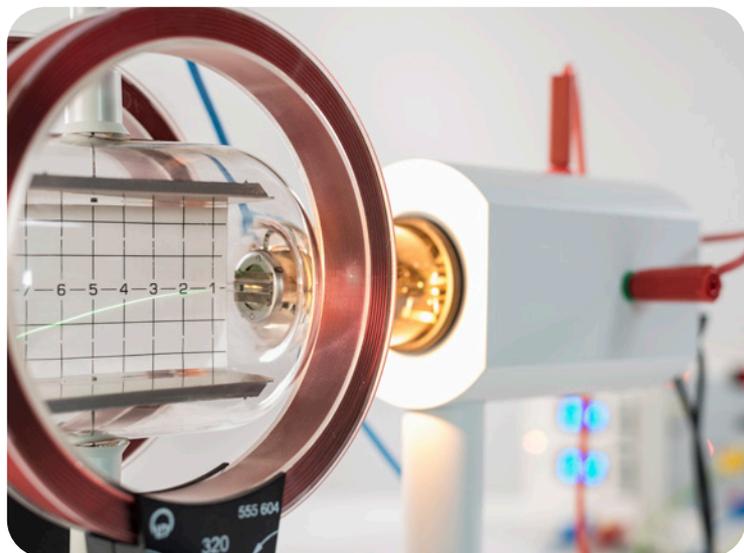


PHYSIQUE

- MECANIQUE
- THERMODYNAMIQUE
- ELECTRICITE
- ELECTRONIQUE
- OPTIQUE
- PHYSIQUE ATOMIQUE ET NUCLEAIRE
- PHYSIQUE DES SOLIDES



EXPÉRIENCES EN TOUTE CONFIANCE AVEC LA QUALITÉ LEYBOLD



L'expérimentation est devenue une partie indispensable de l'enseignement scientifique, indispensable car la combinaison des connaissances théoriques avec des sessions de travaux pratiques assurent un apprentissage durable et réussi. Nous proposons une large gamme d'expériences de haute qualité qui couvrent tous les domaines de la physique. La qualité Leybold garantit la durabilité et la sécurité pendant l'utilisation du matériel.

PLUS DE 500
EXPÉRIENCES
DANS DIFFÉRENTS
DOMAINES DE LA
PHYSIQUE



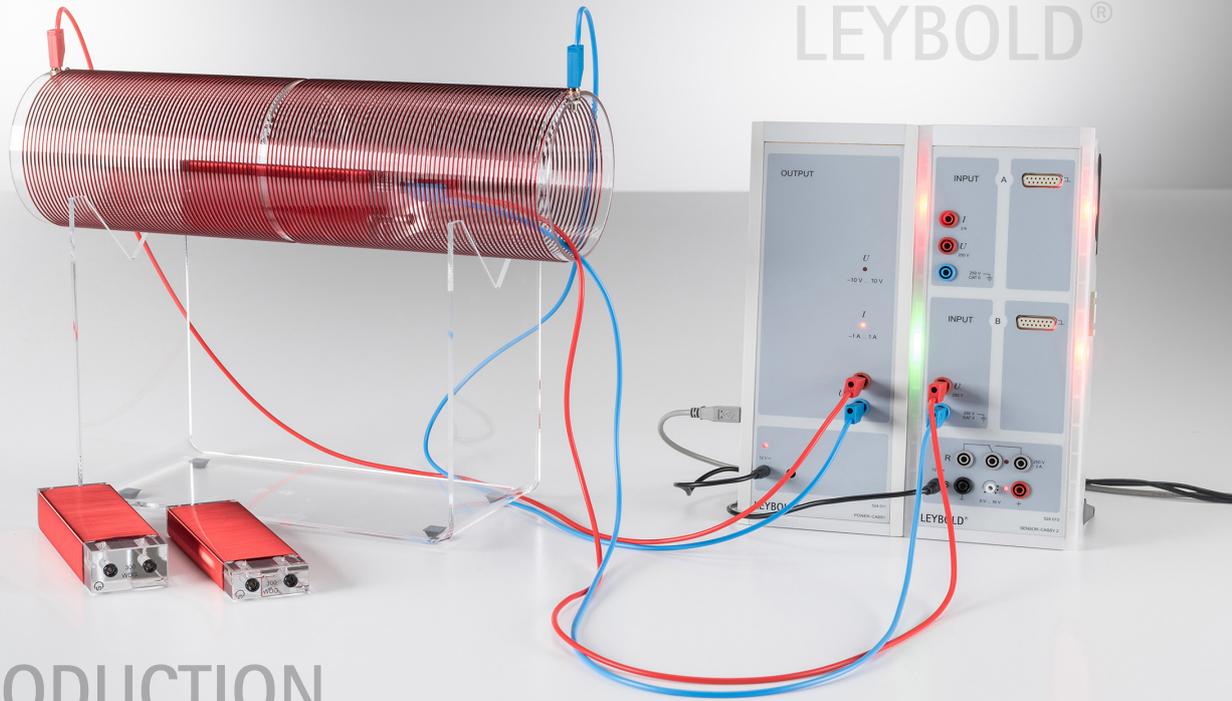
Elles sont proposées dans plusieurs versions (par exemple avec ou sans interface PC), elles peuvent être adaptées en fonction du temps disponible et au niveau d'enseignement. Les expériences sont accompagnées de fiches de TP, qui guident de façon claire étape par étape. Des conseils, des relevés de mesure et des consignes de sécurité sont indiqués.

Nous sommes à votre disposition pour vous conseiller personnellement et vous présenter nos expériences.

Amusez-vous en expérimentant !

D'AUTRES EXPÉRIENCES SONT
DISPONIBLES SUR LE SITE WEB

WWW.LEYBOLD-SHOP.COM



INTRODUCTION

LD DIDACTIC – A PROPOS DE NOUS	II-III
EXEMPLES DE LABORATOIRES TYPES LEYBOLD	IV-V
LES EXPERIENCES DE REFERENCE	VI-VII
MACHINE A RAYON X LEYBOLD	VIII-IX
LEYLAB – UN OUTIL DE GESTION DU LABORATOIRE	X-XI
FICHES DE TP + LAB DOC EDITOR	XII-XIII
SYSTEME CASSY – ACQUISITION DE DONNEES	XIV-XV
UNE SOLUTION UNIQUE – DU CONSEIL A LA FORMATION	XVI-XVII
APERCU DE TOUTES LES EXPERIENCES	XVIII-XIX
COMMENT UTILISER CE CATALOGUE	XX

EXPERIENCES

P1	MECANIQUE	1
P2	THERMODYNAMIQUE	57
P3	ELECTRICITE	78
P4	ELECTRONIQUE	128
P5	OPTIQUE	142
P6	PHYSIQUE ATOMIQUE ET NUCELAIRE	190
P7	PHYSIQUE DES SOLIDES	231
	REGISTRE	246

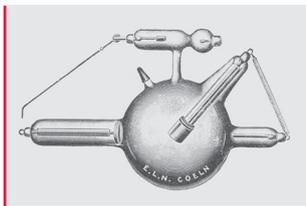
PLUS DE
170 ANS
D'EXPERIENCES

LE GROUPE LD DIDACTIC

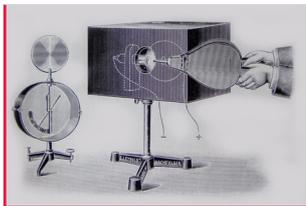
NOTRE PASSION : L'EXPERIMENTATION



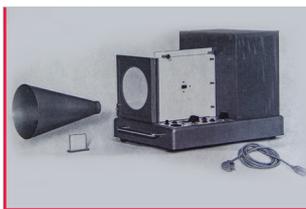
TRADITION AND INNOVATION



1896



1929



1968



1980



2004

X-ray apparatus

DES EXPERIENCES POUR LES ETUDIANTS ET LA DEMONSTRATION DEPUIS PLUS DE 170 ANS

UNE ASSOCIATION DE LA THEORIE ET DE LA PRATIQUE EST LE SECRET DU SUCCES

L'expérimentation a toujours été une compétence essentielle des scientifiques, permettant de comprendre les phénomènes physiques. La planification, la réalisation et les relevés des expériences sont des éléments importants d'un enseignement scientifique. Afin de renforcer l'acquisition des nouvelles connaissances, l'expérimentation doit être en adéquation avec la théorie.

UN AVANTAGE DANS UN MONDE CONCURRENTIEL

Nous croyons en l'importance de l'éducation comme moteur fondamental du développement personnel, national et mondial. Dans un monde hautement spécialisé, les connaissances sont devenues des facteurs décisifs. Investir dans la formation pratique de vos étudiants et les doter de compétences scientifiques solides exigées par le marché du travail est l'un des éléments clés de la réussite.

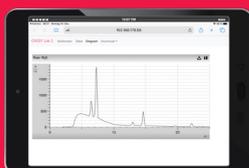
LA PASSION DU MATERIEL PEDAGOGIQUE EST DANS NOTRE ADN

Le groupe LD DIDACTIC est l'un des principaux fabricants mondiaux d'équipement pour l'enseignement et la formation. Dès le début en 1850, LEYBOLD recherche comment transmettre un contenu académique à des élèves, en fonction des différents niveaux d'enseignement. Par conséquent, nous sommes fiers de nos systèmes de formation et d'enseignement depuis des générations.

Cependant, après plus de 170 ans d'expérience, nous continuons à faire évoluer nos équipements en fonction de la demande de nos clients, des programmes et de l'évolution technologique pour maintenir un haut niveau de qualité.

2021

LEYBOLD®



L'APPAREIL A RAYON X TOUJOURS A LA POINTE DE LA TECHNOLOGIE

Un parfait exemple de l'esprit d'innovation chez LD DIDACTIC

A peine un an après la découverte des rayons X, LD DIDACTIC a créé le premier équipement pour ce nouveau sujet de la physique. Au cours du temps, le dispositif a été amélioré pour la manipulation, les performances et la sécurité.

La nouvelle génération permet l'utilisation de l'imagerie numérique ainsi que le partage des données en temps réel via des appareils mobiles.



DEVELOPPE EN
ALLEMAGNE

LONGUE
DUREE DE VIE
DES PRODUITS

LD DIDACTIC

LE MEILLEUR CHOIX

Plus de 100 000 établissements : collèges, lycées et universités dans plus de 80 pays dans le monde, nous font confiance, parmi lesquelles des universités prestigieuses comme Harvard, Oxford, Cambridge, Stanford, Yale, Toronto Tsinghua et Singapour.

VOTRE AVANTAGE

PLUS DE 170 EXPERIENCES
BASEES SUR LE SYSTEME
SCOLAIRE ALLEMAND

VOUS RECEVEZ

UNE SOLUTION CLE EN
MAIN PERSONALISEE

VOUS FOURNISSEZ

UNE SOLUTION PERTINENTE
SIMPLE A UTILISER
A VOS ETUDIANTS

VOUS GAGNEZ

EN SAVOIR FAIRE

VOUS OBTENEZ

DES RESULTATS
D'APPRENTISSAGE ELEVES
ET DURABLES

VOUS GARANTISSEZ

UNE BONNE PREPARATION
AUX INNOVATIONS DU FUTUR
(ENSEIGNEMENT NUMERIQUE)



VOUS OBTENEZ UNE QUALITE PREMIUM

VOUS OBTENEZ ...



CONCEPTION ALLEMANDE

- Conçu et développé en Allemagne
- Gestion de la qualité certifiée avec ISO 9001
- Une équipe RED hautement spécialisée avec une formation à la pédagogie

FIABILITE ET AVANTAGES

- Matériaux de qualité et construction solide, reconnus mondialement
- Rapide retour sur investissement grâce à sa longue durée de vie
- Composants réels pour être plus proche de la réalité et de la pratique
- Système modulaire pour permettre des compléments d'articles seuls
- Matériaux faciles à entretenir (Nettoyage)
- Produits fabriqués de manière responsable

VOUS OBTENEZ ...

IDEAL POUR LES ETUDIANTS

- Montage des expériences associées aux fiches de TP
- Les étudiants peuvent configurer et mener des expériences indépendamment
- Robuste, facile à utiliser, en toute sécurisé
- Essayé et testé quotidiennement dans les collèges, les lycées et les universités



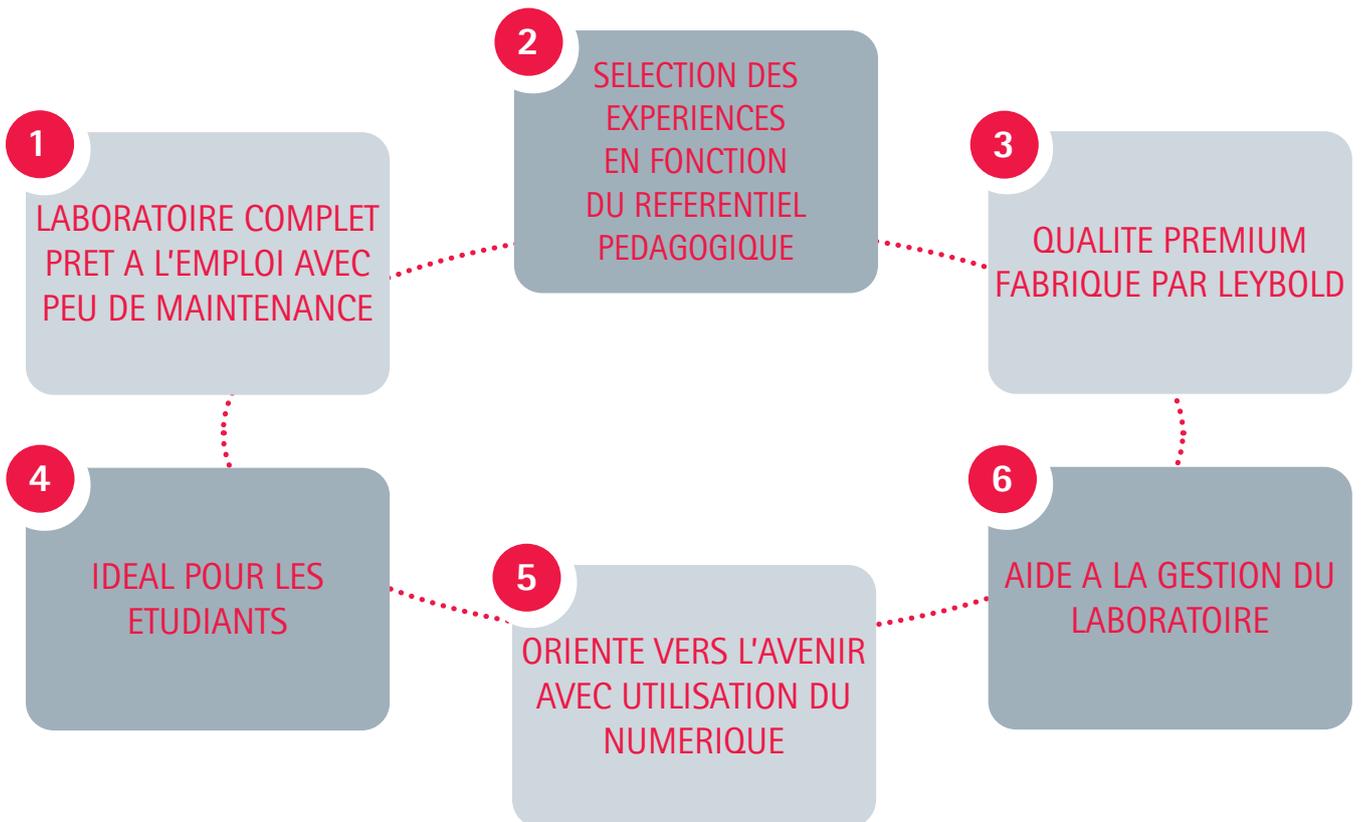
PROPOSITION DE LABORATOIRES TYPES

LEYBOLD

VOTRE LABORATOIRE DE PHYSIQUE LEYBOLD CLEF EN MAINS

Hésitez-vous sur la sélection d'expériences pour votre département ?

LD DIDACTIC a créé 4 exemples de laboratoire de physique couvrant différents domaines, basés sur nos 170 années de coopération avec les universités du monde entier. Cette liste d'équipements comprend des expériences complètes, l'acquisition de données, les logiciels et les fiches de TP ainsi que le consommable nécessaire. De plus, les laboratoires contiennent les outils numériques de Leybold pour la gestion du laboratoire, la préparation numérique des TP.



PROPOSITION DE LABORATOIRE TYPE LEYBOLD

POUR LE NIVEAU LICENCE (BACHELOR)

Des expériences fondamentales selon les programmes des principales universités dans le domaine de la physique couvrant les thèmes de la mécanique, de la thermodynamique, de l'électricité, de l'optique et de la physique atomique.

Cette sélection permet de mettre en pratique les cours pour cinq trimestres, une personnalisation est possible en fonction d'un programme local.

Aller directement consulter le laboratoire type de physique pour niveau Bachelor:



<https://www.ld-didactic.com/complete-laboratory-with-leybold-science-labs>

PROPOSITION DE LABORATOIRE TYPE LEYBOLD

POUR LE NIVEAU MASTER

Des expériences avancées dans le domaine de l'optique, de la physique atomique et nucléaire ainsi que de la physique du solide. Des connaissances approfondies en physique sont nécessaires pour réaliser ces expériences. 14 différentes expériences peuvent être réalisées, y compris lors d'un projet de thèse.

Aller directement consulter le laboratoire type de physique pour niveau Master:



<https://www.ld-didactic.com/complete-laboratory-with-leybold-science-labs>



PROPOSITION DE LABORATOIRE TYPE
LEYBOLD

**POUR DES ETUDIANTS EN CHIMIE,
BIOLOGIE OU AUTRE**

Une petite sélection d'expériences issue de la mécanique, de la thermique pour des étudiants ayant comme matières principales la chimie, la biologie, la géologie, la pharmacie ou l'informatique. Le nombre et la mise œuvre des expériences sont choisis de telle manière qu'ils peuvent être effectués en un trimestre pour apprendre les bases de l'expérimentation.

Aller directement consulter le laboratoire
type de physique pour étudiants en chimie,
biologie, etc...:



<https://www.ld-didactic.com/complete-laboratory-with-leybold-science-labs>

PROPOSITION DE LABORATOIRE TYPE
LEYBOLD

POUR LES INGENIEURS

Une sélection d'expériences de physique en lien avec les technologies (les machines électriques, soufflerie etc...).

La plupart des expériences peuvent être enrichies par des domaines techniques comme l'isolation pour les maisons ou la conception et l'impression 3D de profils aérodynamiques.

Aller directement consulter le laboratoire
type de physique pour ingénieurs:



<https://www.ld-didactic.com/complete-laboratory-with-leybold-science-labs>

EXPERIENCES DE PHYSIQUE

LES POINTS FORTS

PLUS DE
500
EXPERIENCES

Découvrez plus de 500 configurations d'expériences prêtes à l'emploi et couvrant tous les sujets de la physique. Développées en étroite collaboration avec les enseignants et les étudiants du monde entier, les expériences correspondent à tous les programmes internationaux et peuvent être utilisées du baccalauréat jusqu'au master.

Tous les montages d'expériences sont des compilations spéciales comprenant tout l'équipement nécessaire et utilisant des outils numériques d'acquisition. Certaines expériences sont uniques.

MECANIQUE

AERODYNAMIQUE ET HYDRODYNAMIQUE



SOUFFLERIE

P1.8.7.4

- Appareil performant, d'une taille raisonnable pour un laboratoire
- Motivant grâce aux applications réelles (par ex. aile d'avion)
- Convient aux modèles réalisés en imprimante 3D

PAGE 56

CHALEUR

PROPAGATION DE LA CHALEUR



CONDUCTIVITE THERMIQUE

P2.2.1.2

- Etudier la conductivité thermique de l'isolation d'une maison au cours de la journée
- Comparaison des différentes techniques de mesure
- Possibilité de concevoir ses propres matériaux isolants et de les tester

PAGE 62

ELECTRICITE OSCILLATIONS ET ONDES ELECTROMAGNETIQUES



ONDES DECIMETRIQUES

P3.7.2.2

- Expérience macroscopique sur les phénomènes ondulatoires des ondes électromagnétiques
- Polarisation et changement de longueurs d'ondes dans différents diélectriques
- Application pour la transmission de données

PAGE 119

PHYSIQUE ATOMIQUE ET NUCLEAIR PHYSIQUE NUCLEAIRE



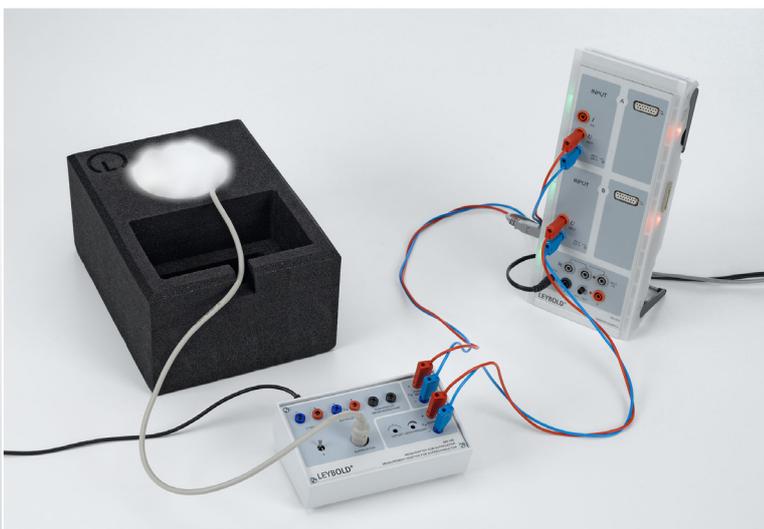
DIFFUSION DE RUTHERFORD

P6.5.2.1

- Montage didactique, mesure directe du taux de comptage
- Manipulation simple et sûre
- Fiche de TP avec résultats expérimentaux
- Expérience cruciale

PAGE 223

PHYSIQUE DES SOLIDES PHENOMENES DE CONDUCTION



SUPRACONDUCTION

P7.2.6.1

- Montage simple pour l'étude de la supraconductivité et de la température de curie
- Facile : il suffit d'ajouter de l'azote liquide et de mesurer
- Compatible avec tous les systèmes d'acquisition

PAGE 242

MACHINE A RAYONS X LEYBOLD

TOTALLY
100 %
SAFE

APPAREIL SECURISE AVEC TECHNOLOGIE PERMETTANT DE CHANGER LES TUBES

Le système à rayons X LEYBOLD propose des options incroyables pour des TP étudiants, c'est la 6ème génération depuis 1896.



- Une sécurité garantie par une certification allemande pour une utilisation dans l'enseignement
- Une large gamme d'applications basées sur 6 tubes interchangeables, par ex. Fer, argent et or
- Une résolution et une intensité incroyables
- Une configuration en fonction de vos besoins grâce à la structure modulaire
- Un fonctionnement intuitif et clair avec le principe du « Un bouton-une fonction »
- Un grand afficheur LED intégré et un écran extra fluorescent
- Un grand volume pour la tomographie (8x8x8cm)

EQUIPEMENT DE BASE

APPAREIL A RAYONS X

L'appareil à rayons x est disponible en deux variantes - comme appareil de base ou en tant qu'appareil complet avec un tube en Mo, un goniomètre et monocristal NaCl. Si vous souhaitez utiliser d'autres tubes, l'appareil de base à rayons x est la solution la plus flexible.

Vous pouvez compléter l'appareil à rayons x avec un tiroir pour ranger vos accessoires.

GONIOMETRE

Peu importe si vous êtes intéressés par les spectres de Bragg, l'énergie des rayons x, les spectres ou la tomographie, vous saurez apprécier la précision et de la haute résolution du goniomètre.

TUBES

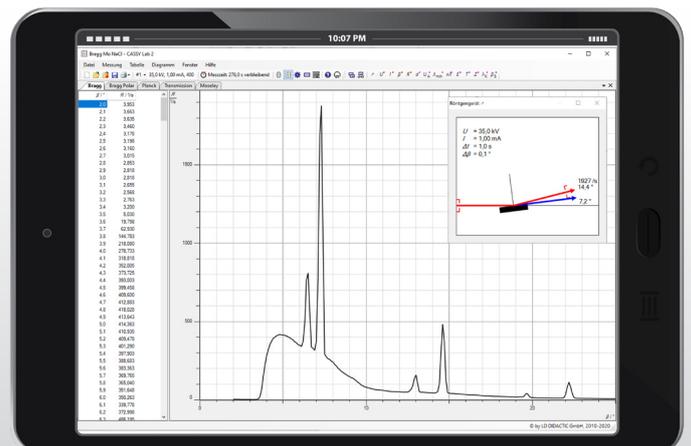
En plus du tube au Mo, il y a d'autres tubes, qui conviennent mieux à certaines expériences. Par exemple, le tube en cuivre pour un diagramme de debye-Scherrer, ou l'argent pour fluorescence x avec ses raies de haute énergie, le tungstène ou l'or pour la tomographie en raison de leur haute intensité.

LOGICIEL

CASSY LAB 2 POUR LA MACHINE A RAYONS X

Cassy Lab 2 permet l'enregistrement et l'affichage de diagrammes comme les spectres de Bragg.

Le logiciel permet également le partage en direct des spectres sur les outils numériques des étudiants. Une bibliothèque de formules pour l'analyse des spectres enregistrés, une aide en ligne, l'exploitation de l'accessoire HD, sont quelques exemples des possibilités de Cassy Lab 2.



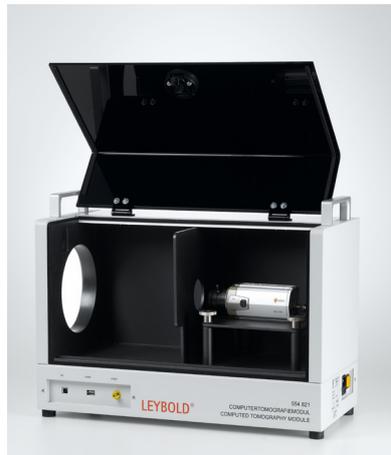


DÉTECTEUR D'ÉNERGIE A RAYONS X

Le détecteur d'énergie à rayons X enregistre à l'aide du système CASSY des spectres d'énergie à rayons X. Divers éléments chimiques peuvent être facilement distingués grâce à leur rayonnement X caractéristique, ainsi qu'à leur concentration massive. Cela permet aussi de démontrer l'effet Compton.

MODULE DE TOMOGRAPHIE ASSISTEE PAR ORDINATEUR

Le module de tomographie assistée par ordinateur capture une image radiographique visible, le logiciel permet de contrôler la rotation de l'objet dans l'appareil à rayons X sur 360° et effectue la rétroprojection de l'image radiographique pour une reconstruction 3D en temps réel.



SPECTRES DE BRAGG

Avec un appareil complet comprenant un tube au Mo, vous avez l'indispensable pour enregistrer votre premier spectre de Bragg. D'autres monocristaux et/ou tubes à rayons X sont disponibles pour varier les expérimentations.

Vous trouverez une sélection de nos expériences sur les rayons X dans les pages suivantes :

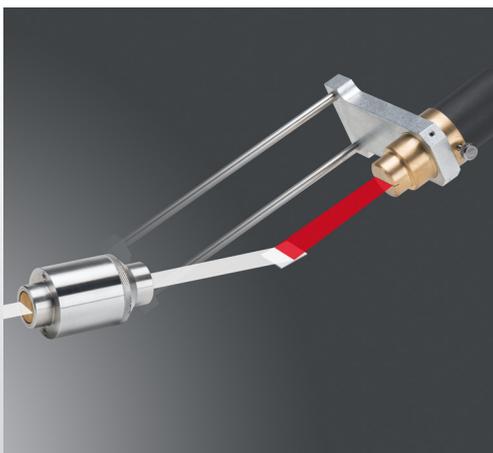
PHYSIQUE DES RAYONS X
P6.3.1-7 pages 207-217

DIFFUSION DES RAYONS X
P7.1.2 pages 233-234

ANALYSE DE LA FLUORESCENCE
DES RAYONS X
P7.5.1 page 245

LA TOMOGRAPHIE PRO PAR ORDINATEUR

Si la résolution du module de tomographie assistée par ordinateur est insuffisante, le capteur d'image à rayons X apporte la solution grâce à sa résolution en mégapixel et à son échelle de gris sur 14 bits. Le capteur d'images à rayons X permet également une solution confortable et rapide pour les diagrammes de Laue et de Debye-Scherrer.



ACCESSOIRE HD

Avec l'accessoire HD composé d'un collimateur, d'un support de tube compteur avec des fentes étroites et d'un nouveau logiciel à haute résolution, la résolution angulaire du goniomètre passe à 0,01°. Il est possible de réaliser des spectres de Bragg avec une résolution 4 fois supérieures.

TUBE D'OR

Le tube en or est le tube de LEYBOLD avec la plus haute intensité. Il est particulièrement adapté à la capture d'images radiologiques, de diagrammes de Laue ou de tomographies par ordinateur. Avec le tube en tungstène, c'est aussi le seul dont les spectres de Bragg sont constitués des lignes L.

LEYLAB

PORTAIL EN LIGNE POUR L'ORGANISATION ET LA GESTION DES EXPERIENCES, DES EQUIPEMENTS ET DE LA DOCUMENTATION

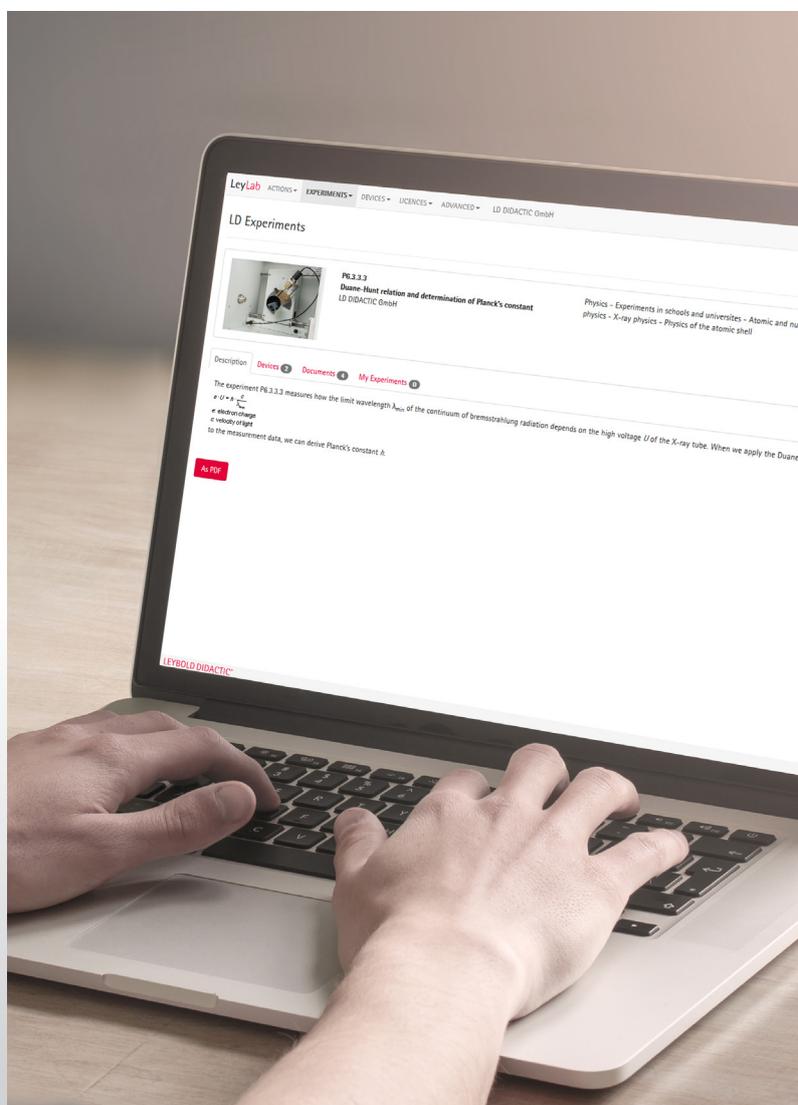


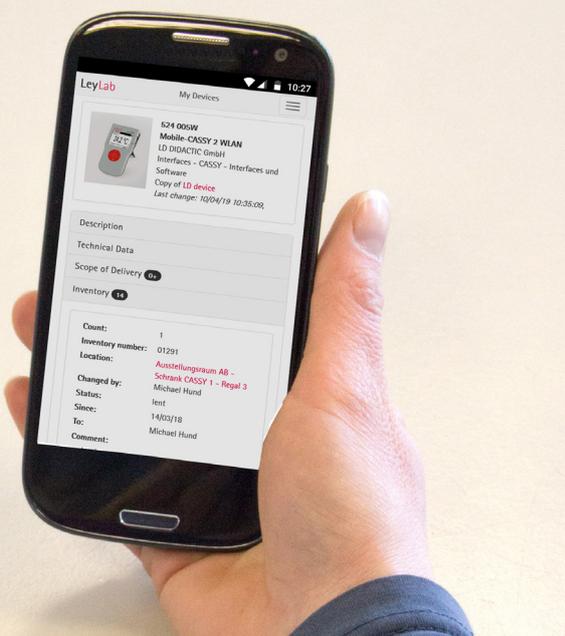
LEYLAB

- Portail 100 % en ligne
- Organisation et gestion centralisées des expériences et des dispositifs
- Aucune installation nécessaire
- Pour toutes les plateformes, tablettes, smartphones, ordinateurs portables ou PC
- Tutoriels vidéo inclus
- Accessible à tout moment et en tous lieux

À TOUT MOMENT ET DE PARTOUT COLLECTIONS D'EXPERIENCES

- Accès à l'ensemble du catalogue d'expériences de LD avec toutes les informations pertinentes pour chaque expérience.
- Trouvez l'expérience souhaitée rapidement et de manière fiable
- Créez votre propre collection d'expériences
- Développez facilement les expériences LD
- Créez facilement de nouvelles expériences
- Reliez intelligemment les appareils avec les expériences
- Les documents ressources sont associés à l'expérience
- Bibliothèque de documents ressources comme des PDF, vidéos, ou lien, App à partager avec les étudiants





L'INVENTAIRE EN UN COUP D'ŒIL COLLECTE DES APPAREILS

- Aperçu direct de tous les dispositifs disponibles, avec la quantité et l'emplacement de stockage.
- Gagnez du temps dans la recherche d'appareils
- Informations détaillées sur chaque article
- Inventaire facile de la collection complète
 - Dispositifs LD et dispositifs d'autres fabricants
 - Avec fonctionnalité des codes-barres
- Gestion claire de l'inventaire avec fonction des gestions des emprunts et des retours

DISPONIBLE AU NIVEAU CENTRAL DOCUMENTATION

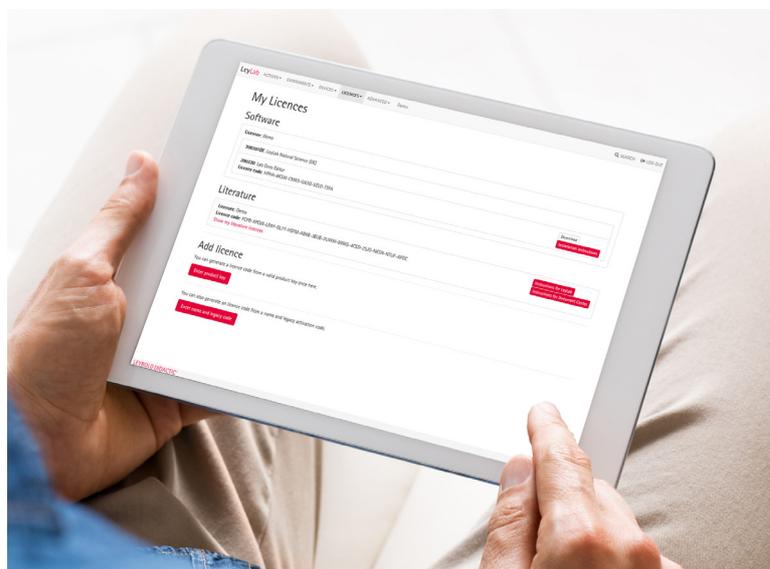
- Le Manuel LD acheté est associé à l'expérience.
- Peut être facilement partagée avec tous les élèves
- Vos propres fiches d'expérience peuvent être intégrées

TOUT EN UN SEUL ENDROIT GESTION DES LICENCES

- Gérez tous les logiciels et la documentation LD
- Les codes de licence sont stockés en toute sécurité dans le cloud, ils ne sont donc pas perdus et peuvent être utilisés pour installer des logiciels sur un nouveau matériel.

PARTAGER L'INFORMATION ACCÈS DES INVITÉS ET DES COLLABORATEURS

- Possibilité de créer des accès à des invités
- Collaborer avec des collègues
- Gestion des utilisateurs avec différents niveaux d'accès
- Partager des informations avec d'autres enseignants d'autres établissements
- Permet une organisation centralisée (par exemple par le ministère) de nombreux établissements et donc une gestion plus efficace de l'équipement et des documents.



PORTAIL LEYLAB-ONLINE

- Licence collège/Lycée/université
- Pour un nombre d'utilisateurs illimité
- Inventaire illimité d'appareils et d'expériences
- Le compte peut être supprimé complètement à tout moment
- De nombreuses fiches d'expériences sont également disponibles



FICHES DE TRAVAUX PRATIQUES

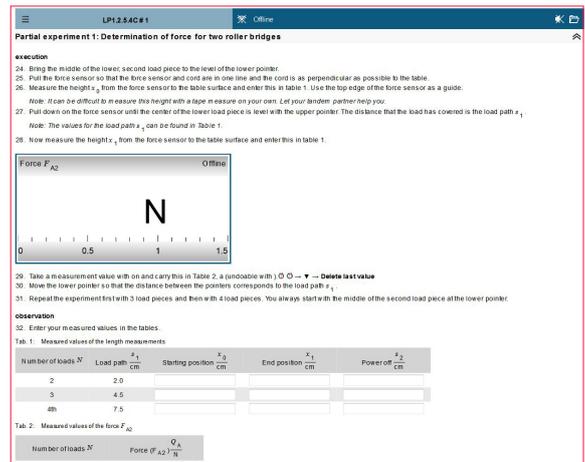
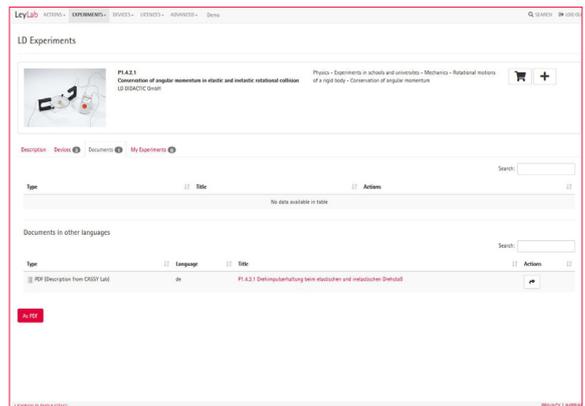
UN SOUTIEN PARFAIT POUR VOUS ET VOS ETUDIANTS

Nos guides d'expérimentation sont faciles à utiliser, à distribuer et à intégrer dans votre enseignement. Ils sont adaptés aux besoins, conformes aux référentiels et intuitifs.

GAIN DE TEMPS

PREPARATION

- LeyLab contient toutes les fiches de TP des équipements LD achetées, elles sont toujours accessibles
- Toutes les informations sont accessibles à partir de l'expérience - documentation, appareils nécessaires, lieu de stockage et des informations complémentaires.
- La liste des expériences réalisables avec les appareils existants peut être téléchargée.
- Les fiches de TP contiennent des informations détaillées sur les objectifs de l'expérience, l'évaluation et les informations complémentaires.
- Partage facile des fiches de TP
- Mises à jour gratuites et en ligne des fiches de TP dans LeyLab.



FACILE À UTILISER ET FONCTIONNEL

L'EXPERIMENTATION

- Des fiches de travail TP clairement structurées avec des astuces et des illustrations
- Guide étapes par étapes pour réaliser l'expérience et conseils pour une expérimentation en toute sécurité
- Exemples réels de résultats et de diagrammes pour un autocontrôle



DOCUMENTATION

DISTRIBUTION

- Partager les fiches de TP dans LeyLab avec tous les étudiants
- Via un QR code sur site ou en ligne
- Via un lien par e-mail, plateforme d'apprentissage ou cours en ligne
- Via un fichier PDF par e-mail, sur les plateformes d'apprentissage ou dans les cours en ligne.



FICHE DE TRAVAUX PRATIQUES

Des descriptions d'expériences dans tous les domaines de la physique pour le niveau secondaire et universitaire.

- La licence pour une utilisation en ligne dans LeyLab
- Pack complet de toutes les fiches de TP disponibles pour ce catalogue



<http://www.leybold-shop.com/597310>

597 310 Ensemble des fiches de TP de Physique, format numérique (clé de produit)

ÉDITEUR DE FICHES DE TP

CRÉEZ VOS PROPRES FICHES

D'EXPERIMENTATIONS NUMÉRIQUES



L'éditeur Lab Docs est un outil facile à utiliser qui révolutionne l'édition de fiches d'expériences. Sans aucune connaissance du langage HTML, l'éditeur Lab Docs permet de créer des fiches d'expériences numériques et interactives.

- Créez des fiches de TP et d'exercices, insérez des diagrammes et des tableaux interactifs, ajoutez des champs « question et réponses ».
- Insérez des images, des graphiques vectoriels, des liens hypertextes, etc.
- Préparez et créez des listes de matériel
- Créer des formules en syntaxe LaTeX



200 320 Lab Docs Editor

<http://www.leybold-shop.com/200320>

LE SYSTÈME CASSY

ACQUISITION DE DONNEES

INTERFACES

AVEC OU SANS OPTION PC
ET WIFI

1.



AVEC WIFI
CASSY MOBILE 2



AUSSI AVEC
ADAPTATEUR WIFI
CASSY 2 SENSOR



CASSY DE POCHE 2

- Pour tous les besoins en fonction des contraintes d'enseignement et de formation
- Facile à utiliser
- Acquisition rapide avec une grande sensibilité
- Un choix multiple
- Bibliothèques pour MATLAB et LabVIEW disponibles gratuitement

CAPTEURS

POUR TOUS LES BESOINS

2.

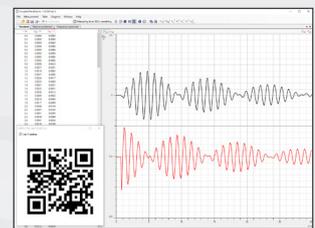


- Plus de 50 capteurs CASSY
- Compatible avec l'ensemble du système CASSY
- Permettant de mesurer plus de 50 grandeurs physiques
- Détection automatique
- Possibilité d'intégrer un capteur existant

LOGICIEL

ENREGISTREMENT
REPRESENTATION ET
EVALUATION DES DONNEES

3.



- Logiciel intuitif et convivial
- Interprétation et évaluation des valeurs enregistrées
- Exemples de configuration clef en main intégrés ou à définir soi-même
- Sauvegarder et partager les données

CASSY - TOUJOURS LA BONNE SOLUTION

Quel que soit la grandeur à mesurer, avec ou sans ordinateur, ou même en utilisant des tablettes de votre classe numérique, CASSY répondra à chacun de vos besoins. Vous trouverez toujours la bonne combinaison d'appareils de mesure, de capteur et de logiciel pour vos acquisitions.



DES MONTAGES EXPÉRIMENTAUX COMPLETS AVEC LES APPAREILS DE MESURE, LES CAPTEURS ET LES LOGICIELS ASSOCIÉS

Pour chaque expérience, le dispositif CASSY et les capteurs recommandés sont inclus dans la configuration de l'expérience pour une acquisition idéale.

Grâce à notre sélection de l'outil de mesure pour chaque expérience, nous garantissons une adéquation parfaite entre les exigences des gammes de mesure et la précision. Lors de la création et des tests de chaque expérience, nous prenons également en compte des facteurs tels que les contraintes techniques et l'importance d'une utilisation facile des outils par les étudiants.

Si vous souhaitez acquérir plusieurs expériences pour votre laboratoire, nous serons heureux de vous conseiller sur la manière d'optimiser le système de mesure.

VOUS OBTENEZ DES MONTAGES EXPÉRIMENTAUX QUI FONCTIONNENT PARFAITEMENT !

Basic device		Nb entrées capteurs	Nb de voies simultanées	Relais intégré	Integrated ability to measure	Inte-grated display	Sauve-gardes internes	Interface PC	compatibilité capteurs	Logiciel
	Sensor-CASSY 2 (524 013)	2	4	YES	U, I, P, E	NO	NO	USB, WiFi adapter	CASSY sensors S	CASSY App CASSY Lab 2 MATLAB LabVIEW
	Mobile-CASSY 2 WiFi (524 005W)	2	3	NO	U, I, P, E et temperature	YES	YES	Integrated WiFi, USB, standalone	CASSY sensors S, CASSY sensors M	CASSY App CASSY Lab 2 MATLAB LabVIEW
	Pocket-CASSY 2 Bluetooth (524 018)	1	1	NO	NONE	NO	NO	Bluetooth, USB	CASSY sensors S	CASSY App CASSY Lab 2 MATLAB LabVIEW
	Universal measurement instrument physics (531 835)	1	1	NO	NONE	YES	NO	USB, standalone	CASSY sensors S (partial)	CASSY Lab 2 MATLAB LabVIEW

CASSY LAB 2

LOGICIEL ÉPROUVÉ POUR L'ENREGISTREMENT ET L'ÉVALUATION DES DONNÉES DE LA FAMILLE CASSY

- Supporte tous les dispositifs et capteurs CASSY
- Serveur de données pour la distribution des mesures en temps réels, des tableaux, graphiques ainsi que des fichiers de mesure sur des tablettes ou des smartphones...
- Une licence pour une utilisation sur un nombre illimité de PC dans un établissement.
- Détection et affichage automatiques des capteurs et adaptateurs.
- Chargement automatique des paramètres pour des expériences types
- Exemples d'expériences directement exploitables
- Enregistrement manuel ou automatique des valeurs
- Les données de mesure peuvent être affichées sous forme d'instruments analogiques/numériques, de tableaux et/ou de graphiques (également simultanément), avec une affectation des axes définissable par l'utilisateur
- Fonctions d'évaluation puissantes comprenant différentes modélisations (droite de régression, parabole, hyperbole, fonction exponentielle, intégrale, modélisation libre), utilisation de formules, différentiation, transformées de Fourier.
- Grâce au QR code, les élèves peuvent suivre les mesures directement sur leur smartphone/tablette et exploiter les données.

LA SOLUTION LD

BIEN PLUS QUE DU MATÉRIEL



ACADÉMIE DIDACTIQUE LEYBOLD

LE CHEMIN VERS L'EXCELLENCE DE L'ENSEIGNEMENT

SUR MESURE



PROGRAMMES DE FORMATION POUR GARANTIR DES INSTALLATIONS ET DES RESSOURCES DURABLES

- Programmes de formation spécialisés pour les enseignants et les formateurs
- Formation méthodologique, didactique et technique
- Le contenu et l'orientation de la formation sont adaptés en fonction des besoins
- Le travail expérimental est le point central, y compris pour la mise en place de travaux pratiques
- Organisation et maintenance des équipements
- La formation est réalisée avec des partenaires externes, écoles, universités et institutions renommées.
- Présentation des normes et tendances didactiques allemandes.
- Guides complets et documentations liées à la formation
- Possibilité d'obtenir une qualification pour former d'autres enseignants ou formateurs

PROJET DE RÉFÉRENCE AU MEXIQUE

L'université "**Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo**" a souhaité former ses enseignants pour améliorer le niveau de formation grâce à la mise en œuvre de TP en classe. Ils ont également acquis un savoir-faire en matière de gestion des laboratoires et dans le processus de formation.



Le séminaire a eu lieu dans les laboratoires de LEYBOLD, l'université de Cologne et dans des centres de formations externes.

P1 MÉCANIQUE

page 1

P1.1 Procédés de mesure
Mesure de longueurs, volumétrie et densimétrie, constante de gravitation

page 3

P1.2 Forces
La force en tant que vecteur, levier, treuils, plan incliné, frottement

page 7

P1.3 Mouvements de translation de la masse ponctuelle
Distance, vitesse, accélération, axiome de Newton, conservation de l'impulsion, chute libre, jet oblique, mouvements unidimensionnels et bidimensionnels

page 13

P1.4 Mouvements de rotation du corps rigide
Vitesse angulaire, accélération angulaire, conservation du moment cinétique, force centrifuge, mouvement d'un gyroscope, moment d'inertie

page 27

P2 CHALEUR

page 65

P2.1 Dilatation thermique
Dilatation thermique des solides et des liquides, anomalie de l'eau

page 67

P2.2 Propagation de la chaleur
Conduction thermique, capteur solaire

page 70

P2.3 La chaleur comme forme d'énergie
Températures de mélange, capacités thermiques, transformation de l'énergie mécanique et électrique en chaleur

page 72

P2.4 changements d'état physique d'un corps
Chaleur de fusion et d'évaporation, pression de vapeur, température critique

page 76

P3 ELECTRICITÉ

page 87

P3.1 Electrostatique
Electromètre, loi de coulomb, lignes de champ et lignes équipotentielles, actions des forces, répartition de la charge, capacité, condensateur à plaques

page 89

P3.2 Notions de base en électricité
Transport de la charge, loi d'Ohm, loi de Kirchhoff, résistance interne des instruments de mesure, électrolyse, électrochimie

page 104

P3.3 Magnétostatique
Magnétisme permanent et électromagnétisme, moment dipolaire magnétique, actions des forces, loi de Biot et Savart

page 111

P3.4 Induction électromagnétique
Saut de tension, induction, courants de Foucault, transformateur, mesure du champ géomagnétique

page 115

P4 ELECTRONIQUE

page 141

P4.1 composants, circuits de base
Sources de courant et de tension, résistances particulières, diodes, transistors, optoélectronique

page 151

P4.2 Amplificateur opérationnel
Structure interne d'un amplificateur opérationnel, circuits d'un amplificateur opérationnel

page 159

P4.3 commande et régulation
Technique de commande, technique de régulation

page 161

P5 OPTIQUE

page 163

P5.1 Optique géométrique
Réflexion, réfraction, loi des lentilles, aberrations, instruments optiques

page 165

P5.2 Dispersion, théorie des couleurs
Indice de réfraction et dispersion, décomposition de la lumière blanche, mélange des couleurs, spectres d'absorption

page 169

P5.3 Optique ondulatoire
Diffraction, interférence à deux faisceaux, anneaux de Newton, interféromètre, hologrammes

page 175

P5.4 Polarisation
Polarisation linéaire et circulaire, biréfringence, activité optique, effet Kerr, effet Pockels, effet Faraday

page 186

P6 PHYSIQUE ATOMIQUE ET NUCLÉAIRE

page 205

P6.1 Expériences d'initiation
Expérience de la tache d'huile, expérience de Millikan, charge spécifique, constante de Planck, dualité onde-corpuscule, expérience de Paul

page 207

P6.2 couche électronique
Série de Balmer, spectres de raies, chocs inélastiques entre électrons, expérience de Franck et Hertz, potentiel critique, résonance de spin électronique, effet Zeeman, pompage optique

page 215

P6.3 Rayons X
Mise en évidence, atténuation de rayons X, réflexion de Bragg, structure fine, loi de Duane-Hunt, loi de Moseley, effet Compton, spectroscopie du rayonnement X, tomographie

page 226

P6.4 Radioactivité
Mise en évidence, distribution de Poisson, désintégration radioactive et demi-vie, atténuation de rayonnements α , β , γ

page 234

P7 PHYSIQUE DES SOLIDES

page 245

P7.1 Propriétés cristallines
Structure cristalline, analyse cristallographique aux rayons X, déformation élastique et plastique

page 247

P7.2 Phénomènes de conduction
Effet Hall, conduction électrique, photoconduction, luminescence, thermoélectricité, supraconductivité

page 250

P7.3 Magnétisme
Diamagnétisme, paramagnétisme et ferromagnétisme, hystérésis ferromagnétique

page 256

P7.5 Microscopie à champ proche
Microscope à effet tunnel

page 258

P1.5 Etude des oscillations
Pendule mathématique et physique, oscillations harmoniques, oscillations de torsion, couplage d'oscillations

page 35

P1.6 P1.6 Etude des ondes
Ondes transversales et longitudinales, sismologie, ondes le long d'une corde, ondes à la surface de l'eau

page 42

P1.7 Acoustiques
Vibrations d'une corde, longueur d'onde et vitesse du son, sons, ultra-sons, effet Doppler, analyse de Fourier

page 47

P1.8 Aérodynamique et hydrodynamique
Barométrie, pression hydrostatique, poussée, viscosité, tension superficielle, aérodynamique, traînée aérodynamique, tunnel aérodynamique

page 57

P2.5 Théorie cinétique des gaz
Mouvement Brownien, lois des gaz, chaleur massique des gaz

page 79

P2.6 Cycle thermodynamique
Moteur à air chaud, pompe à chaleur

page 82

P3.5 Machines électriques
Générateurs électriques, moteurs électriques, machines à courant triphasé

page 122

P3.6 circuits à courant continu et alternatif
condensateur et bobine, résistances à courant alternatif, ponts de mesure, tensions et courants alternatifs, travail et puissance électrique, instruments électromagnétiques

page 126

P3.7 Oscillations et ondes électromagnétiques
circuit oscillant, ondes décimétriques, micro-ondes, radiation des dipôles

page 134

P3.8 Porteurs de charge en mouvement dans le vide
Diode en tube, triode en tube, tube à croix de Malte, tube de Perrin, tube de Thomson

page 140

P3.9 conduction de l'électricité dans les gaz
Décharge autonome et semi-autonome, décharge gazeuse à faible pression, faisceaux cathodiques et rayons canaux

page 145

P5.5 Intensité lumineuse
Grandeurs et mesures photométriques, loi de Stefan-Boltzmann, lois de Kirchhoff

page 192

P5.6 Vitesse de la lumière
Mesure selon Foucault et Michelson, mesure avec des impulsions lumineuses courtes, mesure avec un signal modulé électroniquement

page 194

P5.7 Spectromètre
Spectromètre à prisme, spectromètre à réseau

page 198

P5.8 Laser optique
Laser hélium-néon, résonateurs optiques, vélocimétrie laser

page 202

P6.5 Physique nucléaire
Trajectoires de particules, diffusion de Rutherford, résonance de spin nucléaire, α -spectroscopie, γ -spectroscopie, effet Compton

page 238

P6.6 Physique quantique
Optique quantique

page 244

P7.5 Physique appliquée des corps solides
Analyse par fluorescence X

page 259

COMMENT UTILISER CE CATALOGUE

ORGANISATION DE LA PAGE

Domaine

Sous domaine

Thème

de l'expérience(s)

Expérience(s)

Chaque expérience est identifiée par un P- pour physique et un numéro à quatre chiffres.

Photo d'une expérience d'une expérience, Le numéro de l'expérience est placé entre parenthèses.

Description courte

Du thème et de l'expérience

Préconisation de l'interface CASSY

Noté en rouge

Liste des équipements

pour chaque expérience

Résultats de l'expérience

ou photo(s) supplémentaire(s) du montage expérimental

CASSY marketing

pour reconnaître rapidement l'utilisation du système CASSY

MÉCANIQUE

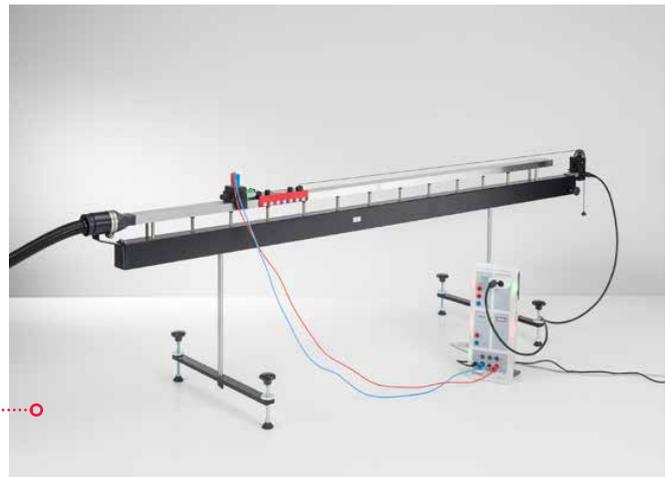
MOUVEMENTS DE TRANSLATION DE LA MASSE PONCTUELLE

MOUVEMENTS UNIDIMENSIONNELS SUR LE BANC À COUSSIN D'AIR

P1.3.3.4 Diagrammes distance-temps et vitesse-temps de mouvements rectilignes

P1.3.3.5 Mouvement uniformément accéléré avec changement de direction - tracé et évaluation avec CASSY

P1.3.3.6 Energie cinétique d'une masse uniformément accélérée - tracé et évaluation avec CASSY



Diagrammes distance-temps et vitesse-temps de mouvements rectilignes (P1.3.3.4)

N° de cat.	Désignation	P1.3.3.4	P1.3.3.5	P1.3.3.6
337 501	Banc à coussin d'air	1	1	1
337 53	Alimentation en air	1	1	1
667 8231	Unité de réglage de la puissance	1	1	1
337 462	Barrière lumineuse combinée	1	1	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1	1	1
524 220	CASSY Lab 2	1	1	1
524 074	Timer S	1	1	1
501 16	Câble de connexion, à 6 pôles, 1,50 m	1	1	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1	1	1
En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		1	1	1

Lors de l'étude de mouvements de translation linéaires sur le banc à coussin d'air, les forces de frottement et les moments d'inertie des roues n'agissent pas comme des grandeurs perturbatrices.

CASSY est un système d'acquisition de données particulièrement adapté aux relevés simultanés du temps écoulé t , de la distance parcourue s , de la vitesse v et de l'accélération a d'un mobile sur le banc à coussin d'air. Le mouvement linéaire du mobile est transmis par l'intermédiaire d'un fil légèrement tendu au capteur de mouvement dont les signaux seront adaptés aux entrées de CASSY par l'adaptateur Timer S. L'exploitation des données est considérablement facilitée par l'utilisation de CASSY Lab. De plus, les données peuvent être utilisées comme valeurs discrètes, sous forme de tableau, pour une exploitation externe. Les mouvements uniformes et uniformément accélérés sur le banc à coussin d'air en position horizontale font l'objet de l'expérience P1.3.3.4.

L'expérience P1.3.3.5 consiste à tracer le déplacement, la vitesse et l'accélération d'un mobile qui monte sur un banc à coussin d'air incliné, s'immobilise puis redescend et rebondit sur l'extrémité élastique, faisant ainsi plusieurs va-et-vient. Au cours de l'expérience P1.3.3.6, l'énergie cinétique

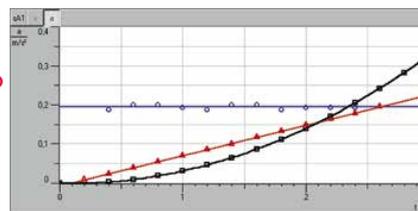
$$E = \frac{m}{2} \cdot v^2$$

d'un mobile uniformément accéléré de masse m est tracée en fonction du temps et comparée avec le travail

$$W = F \cdot s$$

que la force accélératrice F_a engendré. La relation suivante est vérifiée:

$$E(t) = W(t)$$



Diagrammes distance - temps, vitesse - temps et accélération - temps (P1.3.3.4)

CASSY®

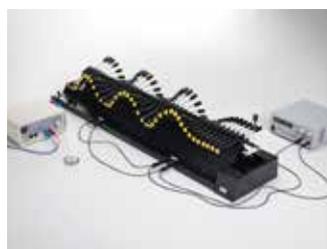
WWW.LD-DIDACTIC.COM

P1 MÉCANIQUE



P1.1	PROCÉDÉS DE MESURE	3
P1.2	FORCES	6
P1.3	MOUVEMENTS DE TRANSLATION DE LA MASSE PONCTUELLE	12
P1.4	MOUVEMENTS DE ROTATION DU CORPS SOLIDE	21
P1.5	ETUDE DES OSCILLATIONS	27
P1.6	ETUDE DES ONDES	34
P1.7	ACOUSTIQUE	39
P1.8	AÉRODYNAMIQUE ET HYDRODYNAMIQUE	49

P1 MÉCANIQUE



P1.1 PROCÉDÉS DE MESURE

P1.1.1	Mesure des longueurs	3
P1.1.2	Volumétrie et densimétrie	4
P1.1.3	Détermination de la constante de gravitation	5

P1.2 FORCES

P1.2.1	Actions des force statiques	6
P1.2.2	La force en tant que vecteur	7
P1.2.3	Levier	8
P1.2.4	Palan	9
P1.2.5	Plan incliné	10
P1.2.6	Frottement	11

P1.3 MOUVEMENTS DE TRANSLATION DE LA MASSE PONCTUELLE

P1.3.2	Mouvements unidimensionnels sur le rail à chariot	12-13
P1.3.3	Mouvements unidimensionnels sur le banc à coussin d'air	14
P1.3.4	Conservation de l'impulsion	15-17
P1.3.5	Chute libre	18-19
P1.3.6	Jet oblique	20

P1.4 MOUVEMENTS DE ROTATION DU CORPS SOLIDE

P1.4.1	Mouvements de rotation	21
P1.4.2	Conservation du moment cinétique	22
P1.4.3	Force centrifuge	23
P1.4.4	Mouvements gyroscopiques	24
P1.4.5	Moment d'inertie	25
P1.4.6	Conservation de l'énergie	36

P1.5 ETUDE DES OSCILLATIONS

P1.5.1	Pendule simple et pendule composé	27-28
P1.5.2	Oscillations harmoniques	29
P1.5.3	Appareil de Pohl	30-31
P1.5.4	Couplage d'oscillations	32-33

P1.6 ETUDE DES ONDES

P1.6.1	Ondes transversales et longitudinales	34
P1.6.2	Scoponde	35
P1.6.3	Ondes à polarisation circulaire d'une corde	36
P1.6.4	Propagation des ondes à la surface de l'eau	37
P1.6.5	Interférence avec des ondes à la surface de l'eau	38

P1.7 ACOUSTIQUE

P1.7.1	Ondes sonores	39
P1.7.2	Oscillations le long d'une corde	40
P1.7.3	Longueur d'onde et vitesse du son	41-43
P1.7.4	Réflexion des ondes ultrasonores	44
P1.7.5	Interférences des ondes ultrasonores	45
P1.7.6	Effet Doppler acoustique	46
P1.7.7	Analyse de Fourier	47
P1.7.8	Ultrason dans un milieu	48

P1.8 AÉRODYNAMIQUE ET HYDRODYNAMIQUE

P1.8.2	Poussée verticale	49
P1.8.3	Viscosité	50-52
P1.8.4	Tension superficielle	53
P1.8.5	Initiation à l'aérodynamique	54
P1.8.6	Mesure de la résistance de l'air	55
P1.8.7	Mesures dans un tunnel aérodynamique	56

MESURE DES LONGUEURS

P1.1.1.1
Emploi d'un pied à coulisse avec vernier

P1.1.1.2
Emploi d'un palmer

P1.1.1.3
Emploi d'un sphéromètre pour la détermination des rayons de courbure



Emploi d'un sphéromètre pour la détermination des rayons de courbure (P1.1.1.3)

N° de cat.	Désignation	P1.1.1.1	P1.1.1.2	P1.1.1.3
311 54	Pied à coulisse de précision	1		
311 83	Palmer de précision		1	
550 35	Fil résistif (cuivre), 0,2 mm Ø, 100 m		1	
550 39	Fil résistif (laiton), 0,5 mm Ø, 50 m		1	
311 86	Sphéromètre			1
460 291	Miroir plan, 11,5 cm x 10 cm			1
662 092	Lamelle couvre-objet, 22 x 22 mm, lot de 100			1
664 154	Verre de montre 80 mm Ø			1
664 157	Verre de montre 125 mm Ø			1

Pied à coulisse, palmer et sphéromètre sont des instruments de mesure de précision utilisés pour toute mesure pratique.

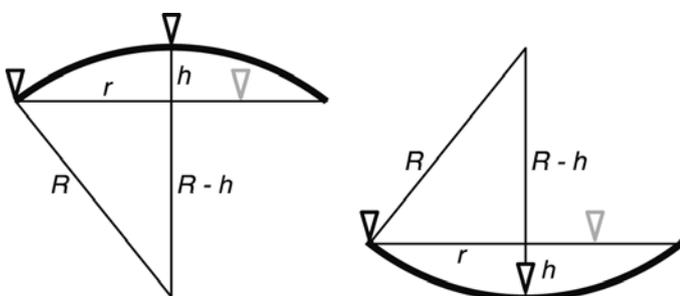
L'expérience P1.1.1.1 consiste à déterminer les dimensions extérieures et intérieures d'un objet à mesurer à l'aide d'un pied à coulisse. Les graduations du vernier du pied à coulisse permettent une précision de lecture au 1/20 mm.

Le but de l'expérience P1.1.1.2 est de mesurer différentes épaisseurs de fils. L'expérience a pour principale difficulté la modification des dimensions de l'objet à mesurer durant le processus de mesure. Le fil étant déformé durant la mesure, le résultat est erroné; il est inférieur à la réalité, notamment lorsqu'il s'agit d'un fil mou.

L'expérience P1.1.1.3 consiste à déterminer les rayons de courbure R de verres de montre à l'aide d'un sphéromètre. Ils sont obtenus selon:

$$R = \frac{r^2}{2h} + \frac{h}{2}$$

où h est la hauteur de la courbure pour un écartement r donné des pieds du sphéromètre.



Coupe verticale schématique du dispositif de mesure avec sphéromètre à gauche : objet à surface convexe, à droite : objet à surface concave (P1.1.1.3)

VOLUMÉTRIE ET DENSIMÉTRIE

P1.1.2.1

Mesure du volume et de la densité de corps solides

P1.1.2.2

Mesure de la densité des liquides avec corps plongeur

P1.1.2.3

Mesure de la densité des liquides avec le pycnomètre de Gay-Lussac

P1.1.2.4

Mesure de la densité de l'air



Mesure de la densité de l'air (P1.1.2.4)

N° de cat.	Désignation	P1.1.2.1	P1.1.2.2	P1.1.2.3	P1.1.2.4
362 04	Vase à trop-plein	1			
590 08	Eprouvette graduée 100 ml	1			
590 06	Bécher gradué SAN, 1000 ml	1			
309 48	Fil de pêche	1			
311 54	Pied à coulisse de précision	1			
315 05	Balance d'enseignement et de laboratoire 311	1	1	1	
352 52	Billes d'acier de 30 mm, jeu de 6	1			
361 63	Cubes (2x) et sphère (1x)	1			
590 33	Corps pesants, jeu de 2	1			
309 42	Colorant, rouge, 10 g	1			
362 025	Plongeur		1		
315 011	Balance hydrostatique		1		
315 31	Jeu de masses marquées, de 10 mg à 200 g		1		
382 21	Thermomètre agitateur -10...+110 °C/1 K		1	1	
665 754	Éprouvette graduée 100 ml, avec pied en plastique		2	2	
671 9720	Éthanol, solvant, 1 l		1	1	
666 145	Pycnomètre de Gay-Lussac, 50 ml			1	
379 07	Sphère à 2 robinets (sphère de pesée gazeuse)				1
667 072	Support pour ballon rond, 250 ml				1
375 58	Pompe à vide manuelle				1

Selon l'état d'agrégation d'un corps homogène, différentes méthodes sont utilisées pour déterminer sa densité

$$\rho = \frac{m}{V}$$

m : masse, V : volume

Pour mesurer la densité de corps solides, on établit un lien entre une pesée et une mesure de volume. Les volumes des corps sont déterminés d'après le volume de liquide qu'ils déplacent dans un récipient. Dans l'expérience P1.1.2.1, on prend l'exemple de corps réguliers dont le volume peut être calculé à partir de leurs dimensions linéaires.

Pour mesurer la densité de liquides, on dispose du corps plongeur dans l'expérience P1.1.2.2. Il s'agit dans les deux cas de déterminer la densité de mélanges d'eau et d'éthanol. Avec le corps plongeur, la densité est déduite de la poussée verticale que subit un corps de volume connu dans le liquide étudié.

Pour mesurer la densité de liquides, on dispose du pycnomètre de Gay-Lussac dans l'expérience P1.1.2.3. Il s'agit de déterminer la densité de mélanges d'eau et d'éthanol. Le pycnomètre est une petite bouteille de forme conique que l'on remplit avec le liquide étudié pour le peser. Le volume intérieur du pycnomètre est déterminé en pesant un liquide de densité connue (par exemple de l'eau).

Dans l'expérience P1.1.2.4, la densité de l'air est déterminée à l'aide d'une sphère à deux robinets, de volume connu. La masse de l'air emprisonné est déterminée par mesure de la différence entre le poids de la sphère remplie d'air et celui de la sphère vide.



DÉTERMINATION DE LA CONSTANTE DE GRAVITATION

P1.1.3.1

Détermination de la constante de gravitation avec la balance de gravitation selon Cavendish – Mesure des déviations avec un spot lumineux

P1.1.3.2

Détermination de la constante de gravitation de Cavendish – tracé des déviations et exploitations avec un détecteur de position à infrarouge et un ordinateur personnel

Détermination de la constante de gravitation avec la balance de gravitation selon Cavendish
- Mesure des déviations avec un spot lumineux (P1.1.3.1)

N° de cat.	Désignation	P1.1.3.1	P1.1.3.2
332 101	Balance de gravitation	1	1
471 791	Laser à diode, 635 nm, 1 mW	1	
313 27	Chronomètre manuel, 60s/0,2s	1	
311 78	Mètre ruban 2 m	1	
300 02	Pied en V, petit	1	
301 03	Noix double à pinces tournantes	1	
301 01	Noix Leybold	1	
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø	1	
332 11	Détecteur de position à infrarouge		1
460 32	Banc d'optique à profil normalisé, 1 m		1
460 373	Cavalier 60/50 pour l'optique		1
460 374	Cavalier 90/50 pour l'optique		1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		1

La partie principale de la balance de gravitation de Cavendish est constituée par une traverse légère suspendue horizontalement à un mince fil de torsion. Elle porte à chacune de ses extrémités une sphère en plomb de masse $m_2 = 15$ g. Ces sphères sont attirées par deux grosses sphères en plomb de masse $m_1 = 1,5$ kg. Bien que la force d'attraction

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

r : distance entre les centres des sphères

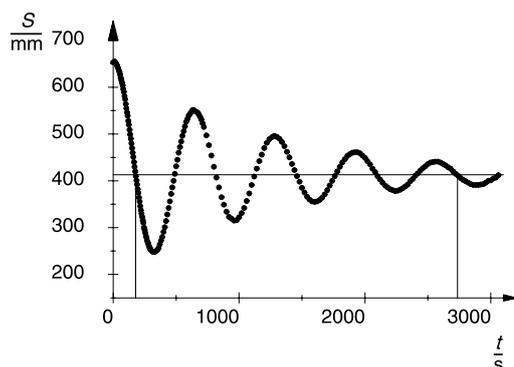
soit inférieure à 10^{-9} N, elle peut être mise en évidence avec la balance de torsion d'une extrême sensibilité. On observe et mesure le mouvement des petites sphères de plomb avec un spot lumineux. On déduit la constante de gravitation G d'après la variation du mouvement dans le temps, d'après la masse m_1 et d'après la géométrie du dispositif soit par la méthode de la pleine déviation, soit par la méthode de l'accélération.

La méthode de la pleine déviation permet d'obtenir une erreur de mesure inférieure à 5% lors d'une expérience menée de façon très minutieuse. On calcule la force de gravitation d'après la position de repos des petites sphères de plomb suspendues élastiquement dans le champ de gravitation des grosses sphères et d'après le moment de rappel du fil de torsion. Le moment de rappel est déterminé dynamiquement d'après la période d'oscillation du pendule à torsion.

La méthode de l'accélération ne nécessite qu'une observation de 1 minute environ. On mesure l'accélération des petites sphères par le champ de gravitation des grosses sphères puis on trace la position des sphères en fonction du temps.

Durant l'expérience P1.1.3.1, c'est un rayon laser qui fait office de spot lumineux. Il est réfléchi sur une échelle graduée par le miroir concave du pendule à torsion. Sa position sur l'échelle est tracée manuellement point par point en fonction du temps.

Le mouvement des sphères de plomb dans la balance de gravitation peut être suivi automatiquement avec le détecteur de position à infrarouge (IRPD: IR Position Detector). A l'intérieur de l'IRPD, quatre diodes IR émettent un faisceau infrarouge qui est renvoyé par le miroir concave du pendule à torsion vers une ligne de détection constituée de 32 phototransistors juxtaposés. Un microcontrôleur connecte les quatre diodes IR les unes après les autres et détermine quel phototransistor est éclairé. Le barycentre S de l'éclairage est calculé d'après les quatre mesures isolées. L'IRPD est livré avec la version de démonstration de CASSY Lab nécessaire à l'identification dans l'expérience P1.1.3.2 pour un ordinateur ayant un système d'exploitation à partir de Windows XP. On dispose de la méthode de la pleine déviation ou de la méthode de l'accélération pour les mesures et l'exploitation.



Oscillations de la balance de gravitation de part et d'autre de la position d'équilibre finale SII (P1.1.3.1)

ACTIONS DES FORCE STATIQUES

P1.2.1.1
Elongation d'un ressort à boudin

P1.2.1.2
Flexion d'un ressort à lame



Elongation d'un ressort à boudin (P1.2.1.1)

N° de cat.	Désignation	P1.2.1.1	P1.2.1.2
352 07	Ressort à boudin 10 N/m	1	
352 08	Ressort à boudin 25 N/m	1	
340 85	Masses marquées de 50 g, jeu de 6	1	1
301 21	Embase multifonctionnelle MF	2	2
301 27	Tige 50 cm, 10 mm Ø	2	2
301 26	Tige 25 cm, 10 mm Ø	1	1
301 25	Bloc de noix	1	
311 78	Mètre ruban 2 m	1	1
301 29	Curseurs, paire	1	1
340 811	Axe enfichable	1	
352 051	Ressort à lame		1
666 615	Noix universelle		1
686 50	Plaque métallique		1
309 48	Fil de pêche		1

On peut reconnaître les forces à leurs actions. Par exemple, des forces statiques peuvent déformer un corps. Il s'avère que la déformation est proportionnelle à la force agissante, lorsque celle-ci n'est pas trop importante.

L'expérience P1.2.1.1 montre que l'élongation d'un ressort à boudin est directement proportionnelle à la force F_s , d'après la loi de Hooke:

$$F_s = -D \cdot s$$

D : constante de rappel

Dans l'expérience P1.2.1.2, on étudie la flexion d'un ressort à lame serré d'un seul côté et soumis à l'action d'une force connue, obtenue en suspendant des masses marquées. La déformation est dans ce cas aussi proportionnelle à la force agissante.

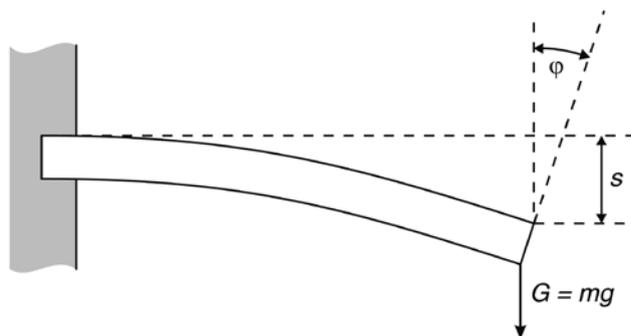
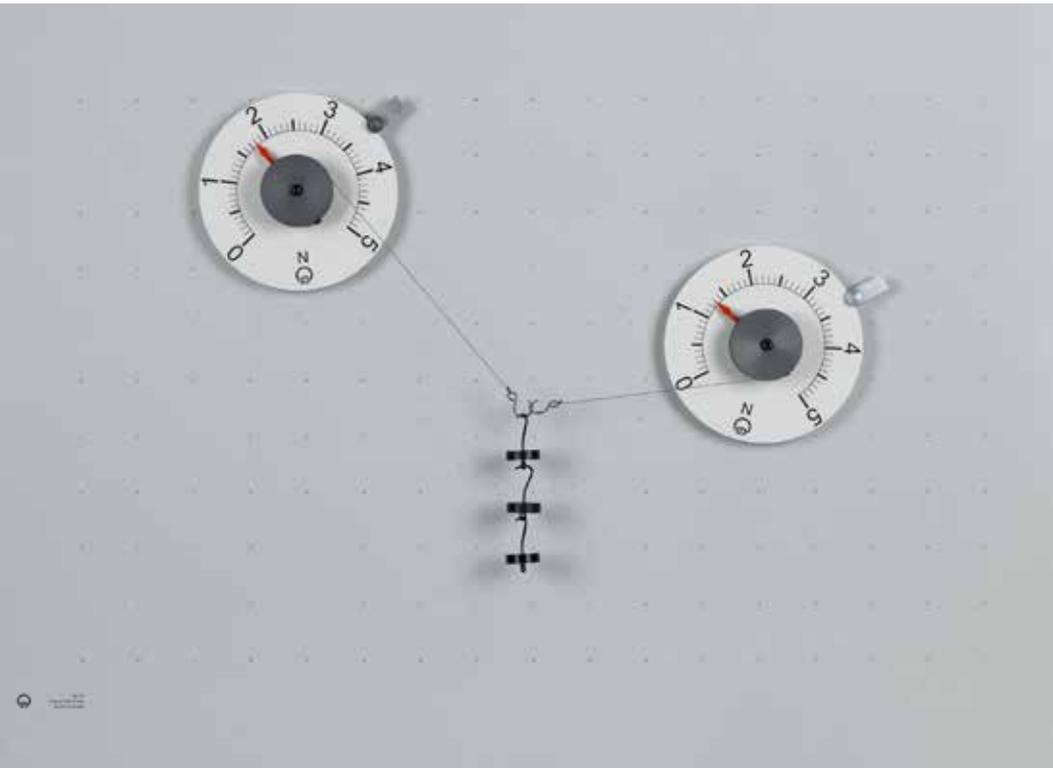


Schéma de la flexion d'un ressort à lame (P1.2.1.2)



LA FORCE EN TANT QUE VECTEUR

P1.2.2.1
Assemblage et décomposition des forces

Assemblage et décomposition des forces (P1.2.2.1)

N° de cat.	Désignation	P1.2.2.1
301 301	Tableau magnétique	1
314 215	Dynamomètre circulaire 5 N	2
301 331	Embase aimantée à crochet	1
352 08	Ressort à boudin 25 N/m	1
311 78	Mètre ruban 2 m	1
342 63	Masses marquées de 50 g	5
301 01	Noix Leybold	4
686 50	Plaque métallique	4
300 44	Tige 100 cm, 12 mm Ø	2
301 07	Pince de table simple	2

Le tableau magnétique est un outil idéal pour mettre en évidence expérimentalement qu'une force est une grandeur vectorielle. On place le point d'application de chaque force au milieu de l'échelle angulaire sur le tableau magnétique et on mesure chacune des forces isolément ainsi que les angles qu'elles forment entre elles. Pour illustrer l'addition des vecteurs, on représente graphiquement le parallélogramme des forces sur le tableau magnétique.

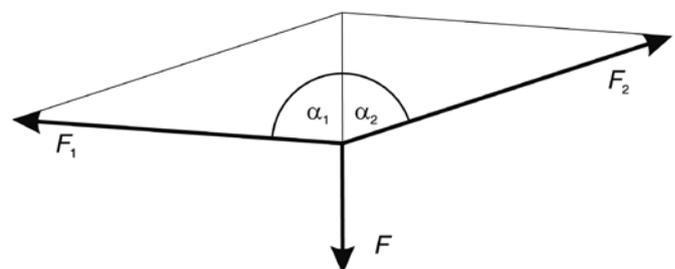
Durant l'expérience P1.2.2.1, une force F quelconque est compensée par l'élasticité de deux dynamomètres formant les angles α_1 et α_2 avec F . Les composantes (forces partielles) F_1 et F_2 sont déterminées en fonction de α_1 et α_2 . Les relations

$$F = F_1 \cdot \cos \alpha_1 + F_2 \cdot \cos \alpha_2$$

et

$$0 = F_1 \cdot \sin \alpha_1 + F_2 \cdot \sin \alpha_2$$

sont vérifiées.



Parallélogramme des forces (P1.2.2.1)

LEVIER

P1.2.3.1

Levier à un et à deux bras

P1.2.3.2

Poulie servant de levier à bras inégaux



Poulie servant de levier à bras inégaux (P1.2.3.2)

N° de cat.	Désignation	P1.2.3.1	P1.2.3.2
342 60	Levier, 1 m	1	
342 63	Masses marquées de 50 g	12	8
314 45	Dynamomètre, 2 N	1	1
314 46	Dynamomètre, 5 N	1	1
300 02	Pied en V, petit	1	1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø	1	1
301 01	Noix Leybold	1	1
342 75	Poulie de transmission		1

La loi du levier constitue un fondement physique pour les transmissions de forces mécaniques de toutes sortes. Elle peut aussi être expliquée d'après le principe de base de l'équilibre de couples de rotation.

Dans l'expérience P1.2.3.1, on vérifie la loi du levier

$$F_1 \cdot x_1 = F_2 \cdot x_2$$

pour un levier à un ou à deux bras. Pour cela, on détermine la force F_1 qui maintient un levier en équilibre en fonction de la force F_2 , du bras de charge x_2 et du bras de puissance x_1 .

Dans l'expérience P1.2.3.2, on explique l'équilibre de couples de rotation avec une poulie. Les notions de force, de bras de puissance et de ligne d'action y sont étayées expérimentalement. Il est explicitement mis en évidence que la valeur du couple de rotation ne dépend que de la force et de la distance entre la ligne d'action et l'axe de rotation.



Levier à un et à deux bras (P1.2.3.1)



PALAN

P1.2.4.1

Poulie fixe, poulie mobile et palan comme machines simples

Poulie fixe, poulie mobile et palan comme machines simples (P1.2.4.1)

N° de cat.	Désignation	P1.2.4.1
340 911	Poulie de 50 mm Ø, enfichable	2
340 921	Poulie de 100 mm Ø, enfichable	2
340 930	Porte-poulies	2
340 811	Axe enfichable	1
340 851	Masse marquée, 50 g	4
340 87	Crochet porte-charge	1
340 89	Coupleur enfichable 4 mm	1
314 04	Crochet de suspension, enfichable	2
314 01	Dynamomètre de traction-compression 1,5 N	1
314 02	Dynamomètre de traction-compression 3,0 N	1
311 78	Mètre ruban 2 m	1
301 29	Curseurs, paire	1
686 51	Fil	1
667 017	Ciseaux 125 mm, bouts arrondis	1
301 21	Embase multifonctionnelle MF	2
301 25	Bloc de noix	2
666 615	Noix universelle	1
301 26	Tige 25 cm, 10 mm Ø	1
301 27	Tige 50 cm, 10 mm Ø	2

La poulie fixe, la poulie mobile et le palan sont des exemples classiques de machines simples. Des expériences avec ces machines constituent l'accès le plus simple à la notion de travail en mécanique.

Dans l'expérience P1.2.4.1 consiste à monter le palan sur la table à l'aide d'une embase multifonctionnelle. Les roulements qui équipent les poulies diminuent considérablement les frottements.

PLAN INCLINÉ

P1.2.5.1

Force de résistance et force normale sur le plan incliné

P1.2.5.2

Détermination du coefficient de frottement statique avec le plan incliné



Force de résistance et force normale sur le plan incliné (P1.2.5.1)

N° de cat.	Désignation	P1.2.5.1	P1.2.5.2
341 21	Plan incliné	1	1
314 141	Dynamomètre de précision, 1,0 N	1	
342 10	Blocs en bois pour l'étude des frottements, paire		1
311 78	Mètre ruban 2 m		1

Le mouvement d'un corps sur un plan incliné se décrit le plus simplement possible en décomposant de façon vectorielle son poids G en une force de résistance F_1 et en une force normale F_2 . La force de résistance est parallèle et la force normale perpendiculaire au plan incliné d'un angle α . Elles valent:

$$F_1 = G \cdot \sin \alpha \quad \text{et} \quad F_2 = G \cdot \cos \alpha$$

Cette décomposition est vérifiée expérimentalement dans l'expérience P1.2.5.1. Pour cela, les deux forces F_1 et F_2 et sont mesurées avec les dynamomètres de précision pour différents angles d'inclinaison α .

Dans l'expérience P1.2.5.2, on utilise le fait que la force normale dépende de l'angle d'inclinaison afin de déterminer quantitativement le coefficient de frottement statique μ d'un corps. L'inclinaison du plan est augmentée jusqu'à ce que le corps perde son adhérence et commence à glisser. D'après la relation entre force de résistance et force de frottement

$$F_1 = \mu \cdot F_2 \quad \text{on déduit} \quad \mu = \tan \alpha$$

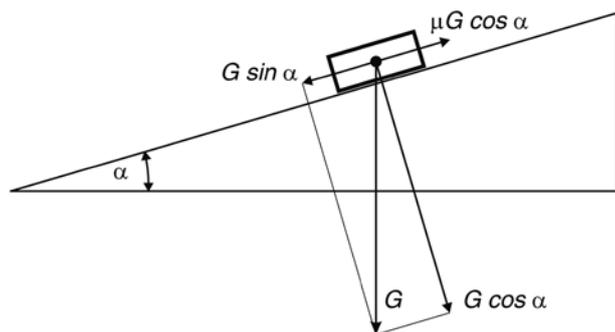


Schéma pour la détermination du coefficient de frottement statique (P1.2.5.2)

FROTTEMENT

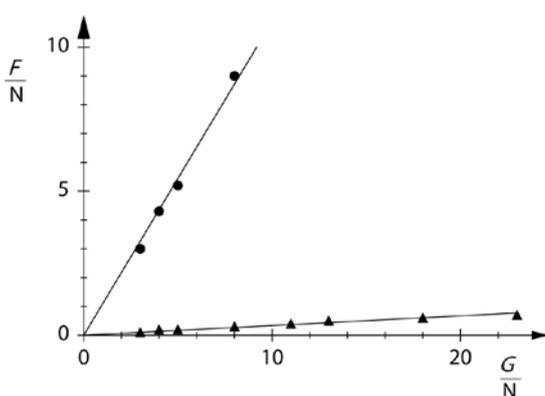
P1.2.6.1

Frottement statique, de glissement et de roulement



Frottement statique, de glissement et de roulement (P1.2.6.1)

N° de cat.	Désignation	P1.2.6.1
315 36	Jeu de masses marquées, 0,1 kg à 2 kg	1
300 40	Tige 10 cm, 12 mm Ø	6
314 47	Dynamomètre, 10 N	1
342 10	Blocs en bois pour l'étude des frottements, paire	1



Comparaison entre le frottement de glissement et le frottement de roulement (P1.2.6.1)

Parmi les frottements qui existent entre deux corps solides, il faut différencier le frottement statique, le frottement de glissement et le frottement de roulement. Une force de frottement statique est la force minimale nécessaire pour faire entrer en mouvement un corps au repos sur un support solide. De même, une force de frottement de glissement est la force nécessaire à la conservation du mouvement uniforme du corps. Le mouvement uniforme d'un corps qui roule sur un autre est conservé par la force de frottement de roulement.

L'expérience P1.2.6.1 consiste à mettre tout d'abord en évidence que la force de frottement statique F_H et la force de frottement de glissement F_G ne dépendent pas de la taille de la surface portante et sont proportionnelles à la force d'appui G du support sur la base du bloc de frottement. On a ainsi

$$F_H = \mu_H \cdot G \text{ et } F_G = \mu_G \cdot G$$

Les coefficients μ_H et μ_G dépendent du matériau des surfaces de frottement. On a toujours:

$$\mu_H > \mu_G$$

Pour faire la différence entre frottement de glissement et de roulement, on place le bloc de frottement sur plusieurs barres de support parallèles les unes aux autres. La force de frottement de roulement F_R mesurée est celle grâce à laquelle le bloc de frottement conserve un mouvement uniforme sur les barres roulantes. Pour comparer, on mesure à nouveau la force de frottement de glissement F_G mais cette fois, le bloc de frottement est tiré sur les barres utilisées comme support fixe (direction de la traction = direction de l'axe des cylindres). L'expérience montre que

$$F_G > F_R$$

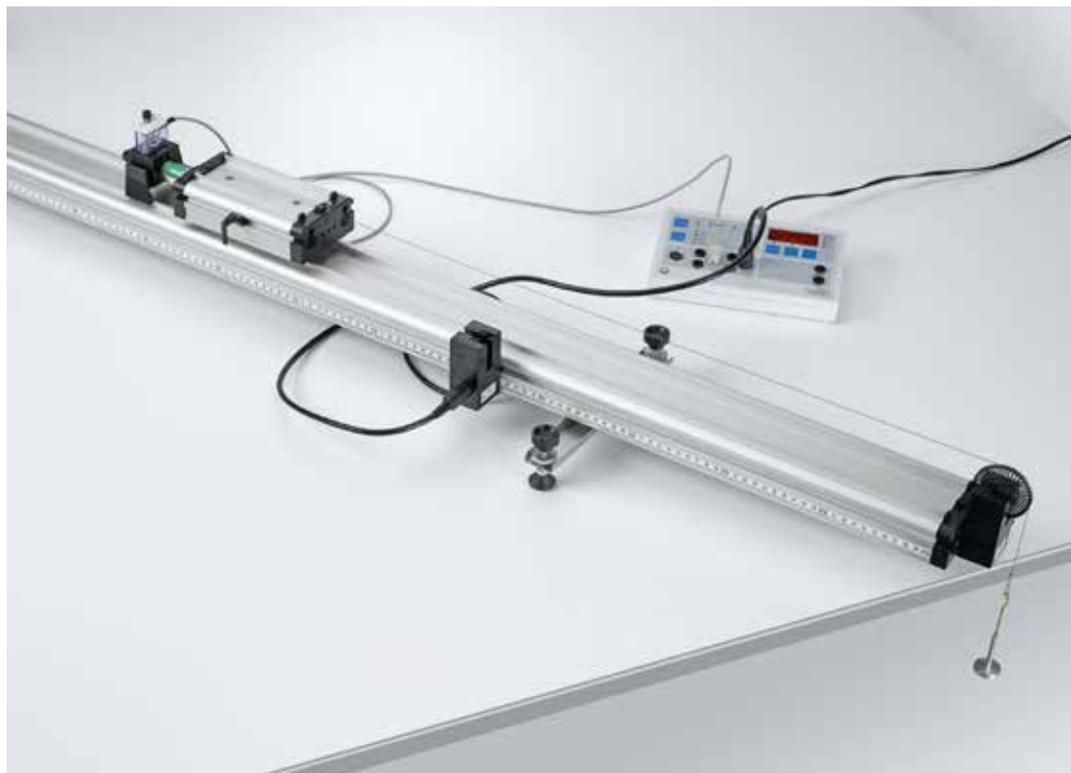
MOUVEMENTS UNIDIMENSIONNELS SUR LE RAIL À CHARIOT

P1.3.2.1

Relevé des diagrammes distance-temps de mouvements rectilignes - chronométrage avec un compteur

P1.3.2.2

Relevé des diagrammes distance-temps de mouvements rectilignes - tracé et évaluation avec CASSY



Relevé des diagrammes distance-temps de mouvements rectilignes - chronométrage avec un compteur (P1.3.2.1)

N° de cat.	Désignation	P1.3.2.1	P1.3.2.2
337 130	Rail 1,5 m	1	1
337 110	Chariot pour rail	1	1
337 114	Masses additionnelles, paire	1*	1*
315 411	Plateau pour masses fendues 10 g	1	1
315 417	Masse fendue 10 g	4	4
309 48	Fil de pêche	1	1
337 462	Barrière lumineuse combinée	1	1
337 463	Support pour roue à rayons combinée	1	
337 464	Roue à rayons combinée	1	1
683 41	Aimant de maintien pour rail	1	1
336 25	Adaptateur pour aimant de maintien avec déclencheur	1	
575 471	Compteur S	1	
501 16	Câble de connexion, à 6 pôles, 1,50 m	1	1
524 013	Sensor-CASSY 2		1
524 220	CASSY Lab 2		1
524 074	Timer S		1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		1

* complément recommandé

Le rail à chariot est l'appareil habituellement utilisé pour l'étude de mouvements de translation linéaires. Le chariot est sur roulements à billes, ses axes sont suspendus sur ressorts et parfaitement escamotables si bien qu'ils ne peuvent pas être endommagés par une surcharge. Les roues sont conçues de telle manière que le chariot s'autocentre et que les frottements sur les flancs des roues soit évités.

Durant l'expérience P1.3.2.1, une approche expérimentale de la définition de la vitesse v en tant que quotient de la différence de distance Δt par la différence de temps Δs correspondante est possible avec des moyens simples. La différence de distance Δs est relevée directement sur le rail à l'aide d'une règle graduée. Le début et la fin de la mesure électronique de la différence de temps sont effectués avec une touche et une barrière lumineuse. Pour étudier les mouvements uniformément accélérés, le chariot est relié à un fil guidé par une poulie auquel différentes masses marquées peuvent être suspendues.

Dans l'expérience P1.3.2.2, on étudie l'évolution du mouvement du chariot sur le rail entraîné par un fil fin. La roue à rayons sert de poulie de renvoi. Les signaux du capteur de déplacement à laser sont enregistrés via l'interface PC CASSY, puis affichés à l'écran sous la forme de diagramme distance - temps. Les courbes s'affichent en temps réel durant le déroulement de l'expérience, une relation claire est créée entre l'évolution du mouvement et le diagramme.

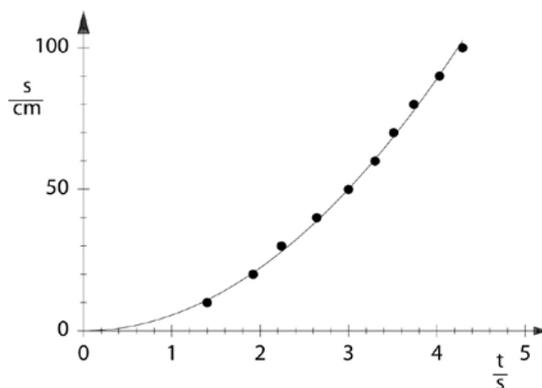


Diagramme distance - temps du mouvement uniformément accéléré (P1.3.2.1)

MOUVEMENTS
 UNIDIMENSIONNELS SUR
 LE RAIL À CHARIOT

P1.3.2.5
 Mouvements accélérés avec un capteur
 d'accélération

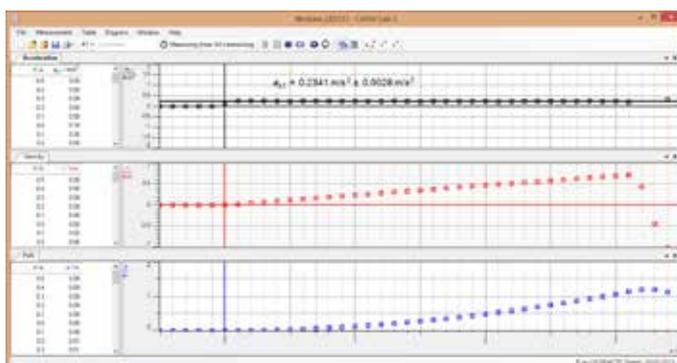


Mouvements accélérés avec un capteur d'accélération (P1.3.2.5)

N° de cat.	Désignation	P1.3.2.5
337 130	Rail 1,5 m	1
337 110	Chariot pour rail	1
337 114	Masses additionnelles, paire	1
524 018	Pocket-CASSY 2 Bluetooth	1
524 019	Accu pour Pocket-CASSY 2 Bluetooth	1
524 0031	Dongle Bluetooth	1
524 220	CASSY Lab 2	1
524 0424	Capteur d'accélération 3D S	1
300 761	Cales, jeu de 6	1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

Le rail à chariot est l'appareil habituellement utilisé pour l'étude de mouvements de translation linéaires. Le chariot est sur roulements à billes, ses axes sont suspendus sur ressorts et parfaitement escamotables si bien qu'ils ne peuvent pas être endommagés par une surcharge. Les roues sont conçues de telle manière que le chariot s'autocentre et que les frottements sur les flancs des roues soit évités.

Dans l'expérience P1.3.2.5, il s'agit de mesurer sans contact l'accélération $a(t)$ que subit un chariot pour rail uniformément accéléré. La méthode de mesure consiste en l'utilisation d'un capteur d'accélération 3 D associé à un Pocket-CASSY 2 Bluetooth. Grâce à sa haute résolution, le capteur permet la mesure immédiate d'accélérations assez faibles sur un rail.



Acceleration, velocity and path of the trolley (P1.3.2.5)

MOUVEMENTS UNIDIMENSIONNELS SUR LE BANC À COUSSIN D'AIR

P1.3.3.4

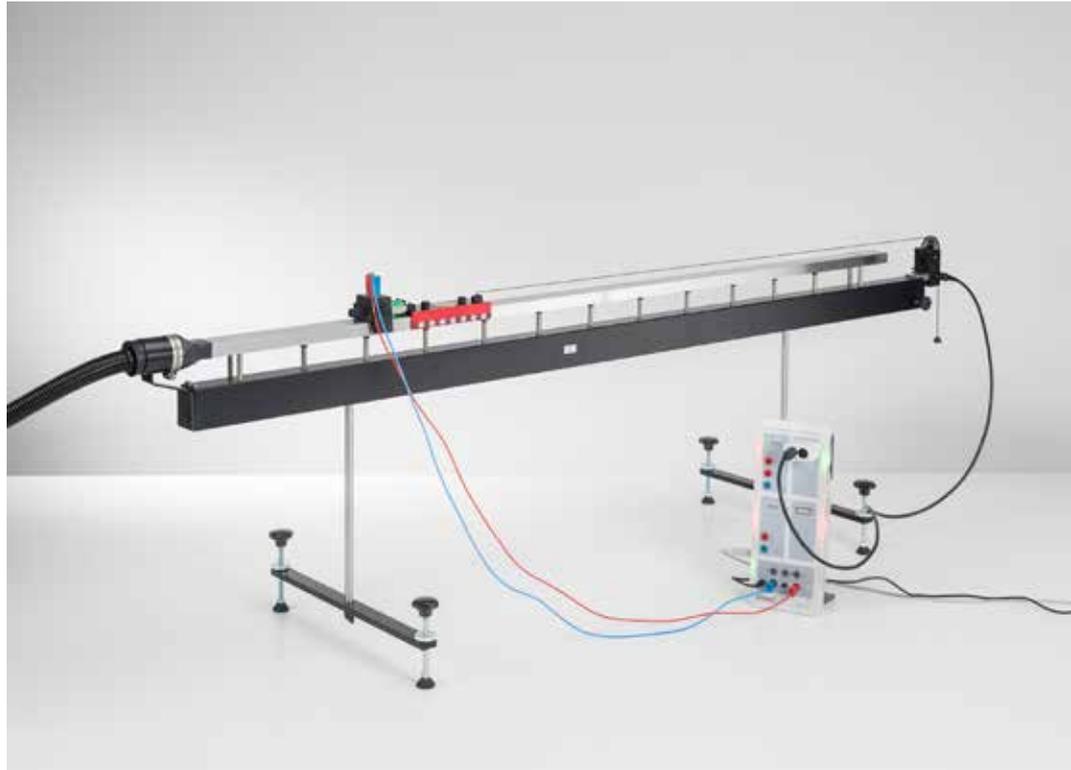
Diagrammes distance-temps et vitesse-temps de mouvements rectilignes

P1.3.3.5

Mouvement uniformément accéléré avec changement de direction - tracé et évaluation avec CASSY

P1.3.3.6

Energie cinétique d'une masse uniformément accélérée - tracé et évaluation avec CASSY



Diagrammes distance-temps et vitesse-temps de mouvements rectilignes (P1.3.3.4)

N° de cat.	Désignation	P1.3.3.4	P1.3.3.5	P1.3.3.6
337 501	Banc à coussin d'air	1	1	1
337 53	Alimentation en air	1	1	1
667 8231	Unité de réglage de la puissance	1	1	1
337 462	Barrière lumineuse combinée	1	1	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1	1	1
524 220	CASSY Lab 2	1	1	1
524 074	Timer S	1	1	1
501 16	Câble de connexion, à 6 pôles, 1,50 m	1	1	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1	1	1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1	1

Lors de l'étude de mouvements de translation linéaires sur le banc à coussin d'air, les forces de frottement et les moments d'inertie des roues n'agissent pas comme des grandeurs perturbatrices.

CASSY est un système d'acquisition de données particulièrement adapté aux relevés simultanés du temps écoulé t , de la distance parcourue s , de la vitesse v et de l'accélération a d'un mobile sur le banc à coussin d'air. Le mouvement linéaire du mobile est transmis par l'intermédiaire d'un fil légèrement tendu au capteur de mouvement dont les signaux seront adaptés aux entrées de CASSY par l'adaptateur Timer S. L'exploitation des données est considérablement facilitée par l'utilisation de CASSY Lab. De plus, les données peuvent être utilisées comme valeurs discrètes, sous forme de tableau, pour une exploitation externe.

Les mouvements uniformes et uniformément accélérés sur le banc à coussin d'air en position horizontale font l'objet de l'expérience P1.3.3.4.

L'expérience P1.3.3.5 consiste à tracer le déplacement, la vitesse et l'accélération d'un mobile qui monte sur un banc à coussin d'air incliné, s'immobilise puis redescend et rebondit sur l'extrémité élastique, faisant ainsi plusieurs va-et-vient.

Au cours de l'expérience P1.3.3.6, l'énergie cinétique

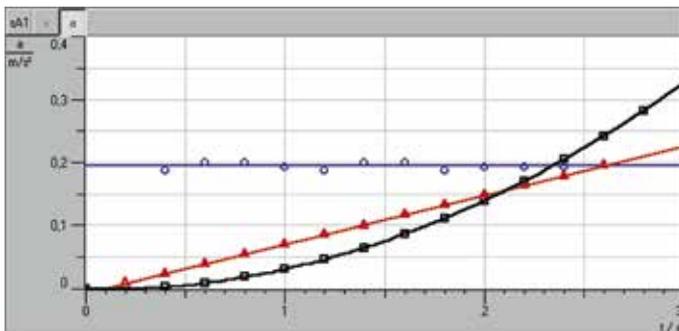
$$E = \frac{m}{2} \cdot v^2$$

d'un mobile uniformément accéléré de masse m est tracée en fonction du temps et comparée avec le travail

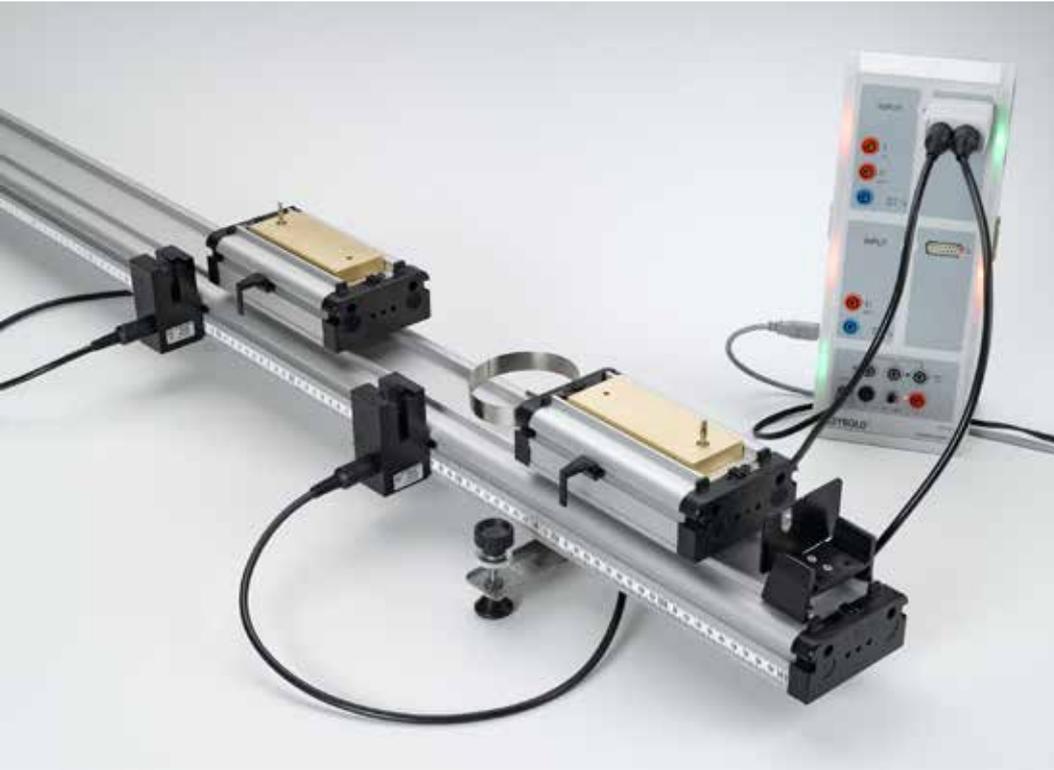
$$W = F \cdot s$$

que la force accélératrice F_a engendré. La relation suivante est vérifiée:

$$E(t) = W(t)$$



Diagrammes distance - temps, vitesse - temps et accélération - temps (P1.3.3.4)



CONSERVATION DE L'IMPULSION

P1.3.4.1

Energie et impulsion lors du choc élastique et inélastique sur le rail à chariot -
Mesure avec deux barrières lumineuses et CASSY

P1.3.4.6

Energie et impulsion lors du choc élastique et inélastique sur le rail à chariot -
Mesure avec deux barrières lumineuses et compteur

Energie et impulsion lors du choc élastique et inélastique sur le rail à chariot
- Mesure avec deux barrières lumineuses et CASSY (P1.3.4.1)

N° de cat.	Désignation	P1.3.4.1	P1.3.4.6
337 130	Rail 1,5 m	1	1
337 110	Chariot pour rail	2	2
337 114	Masses additionnelles, paire	1	1
337 112	Ressort de choc	1	1
337 462	Barrière lumineuse combinée	2	2
524 013	Sensor-CASSY 2	1	
524 220	CASSY Lab 2	1	
524 074	Timer S	1	
501 16	Câble de connexion, à 6 pôles, 1,50 m	2	2
575 451	Compteur P		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		

Lors de la mise en évidence expérimentale de la conservation de l'impulsion, l'utilisation du banc à coussin d'air permet d'obtenir des résultats quantitativement bons. Par exemple, la «perte» d'énergie lors d'un choc élastique peut être maintenue très faible durant une expérimentation menée minutieusement.

Durant l'expérience P1.3.4.1, on mesure le temps Δt_i durant lequel les faisceaux de deux barrières lumineuses sont interrompus par deux mobiles placés sur le rail à chariot, avant ou après un choc élastique ou inélastique. On étudie aussi bien les chocs entre un mobile en mouvement et un objet au repos que ceux entre deux mobiles en mouvement. Les vitesses

$$v_i = \frac{d}{\Delta t_i}$$

d : largeur des lamelles interruptrices

les impulsions

$$p_i = m_i \cdot v_i$$

m_i : masses des mobiles

et les énergies

$$E_i = \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot v_i^2$$

des mobiles avant et après le choc peuvent être calculées et comparées.

Durant l'expérience P1.3.4.6, on mesure le temps Δt_i durant lequel les faisceaux de deux barrières lumineuses sont interrompus par deux mobiles placés sur le rail à chariot, avant ou après un choc élastique ou inélastique. On étudie aussi bien les chocs entre un mobile en mouvement et un objet au repos que ceux entre deux mobiles en mouvement. Les vitesses

$$v_i = \frac{d}{\Delta t_i}$$

d : largeur des lamelles interruptrices

les impulsions

$$p_i = m_i \cdot v_i$$

m_i : masses des mobiles

et les énergies

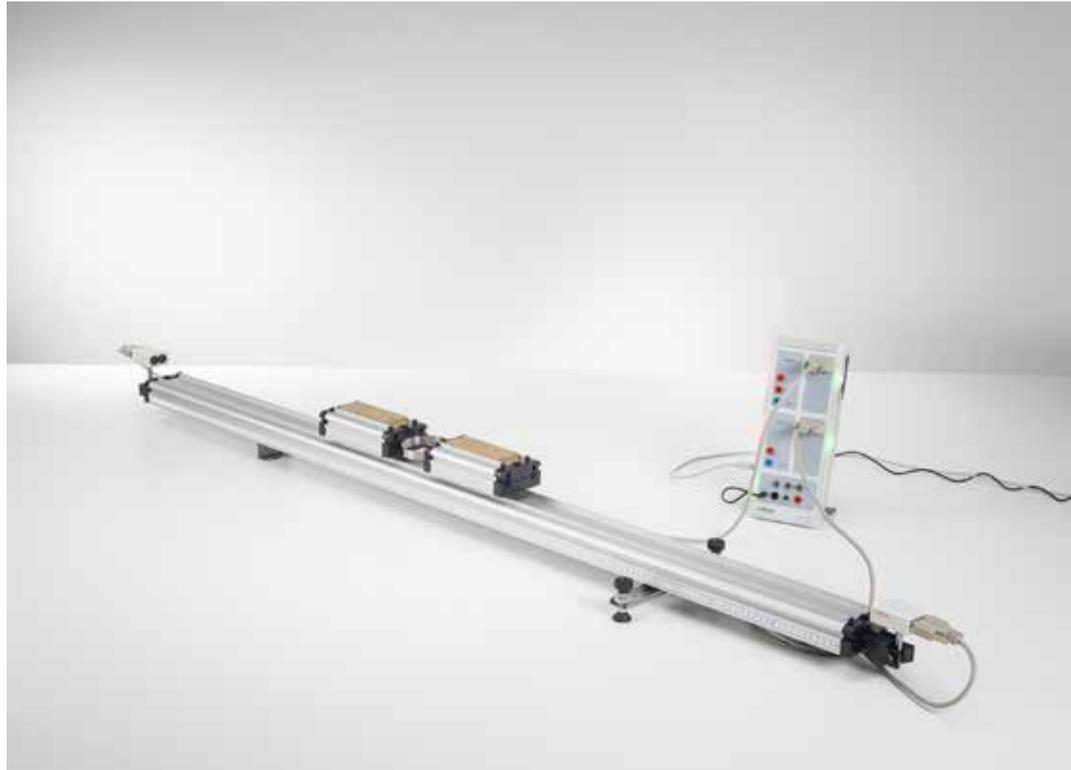
$$E_i = \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot v_i^2$$

des mobiles avant et après le choc peuvent être calculées et comparées.

CONSERVATION DE L'IMPULSION

P1.3.4.5

Troisième axiome de Newton et lois du choc - tracé et évaluation avec deux capteurs à ultrasons et CASSY



Troisième axiome de Newton et lois du choc
- tracé et évaluation avec deux capteurs à ultrasons et CASSY (P1.3.4.5)

N° de cat.	Désignation	P1.3.4.5
337 130	Rail 1,5 m	1
337 110	Chariot pour rail	2
337 114	Masses additionnelles, paire	1
337 473	Ressort de choc, souple	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 220	CASSY Lab 2	1
524 0701	Capteur de déplacement à ultrasons S	2
501 11	Câble rallonge, à 15 pôles	2
301 25	Bloc de noix	2
340 89	Coupleur enfichable 4 mm	4
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

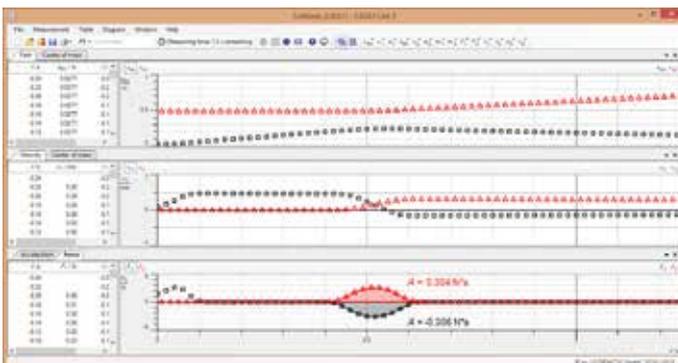
Lors de la mise en évidence expérimentale de la conservation de l'impulsion, l'utilisation du banc à coussin d'air permet d'obtenir des résultats quantitativement bons. Par exemple, la «perte» d'énergie lors d'un choc élastique peut être maintenue très faible durant une expérimentation menée minutieusement.

Dans l'expérience P1.3.4.5, il s'agit de mesurer les distances parcourues pendant un choc élastique ou inélastique. Ceci est réalisé avec deux capteurs à ultrasons. Les diagrammes $v(t)$ et $a(t)$ sont déterminés à l'aide du Sensor-CASSY. Les forces $F_1(t)$ et $F_2(t)$ résultent des accélérations $v_1(t)$ et $v_2(t)$ calculées et des masses m_1 et m_2 des chariots. On confirme que $F_1(t) = -F_2(t)$ pendant le choc. Il s'ensuit la conservation de la quantité de mouvement pendant toute la durée du choc :

$$\Delta p_1 + \Delta p_2 = \int F_1(t) dt + \int F_2(t) dt = \int (F_1(t) + F_2(t)) dt = 0$$

On observe par ailleurs le déplacement du centre d'inertie $s_3(t)$ et on montre que la vitesse $v_3(t)$ du centre d'inertie ne varie pas pendant le choc. Il y a donc une alternative pour la conservation de la quantité de mouvement pendant toute la durée du choc </uni>:

$$v_3 = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2} = \frac{p}{m_1 + m_2} = \text{const.}$$



Path, velocity and momentum transfer during the collision (P1.3.4.5)



CONSERVATION DE L'IMPULSION

P1.3.4.8

Energie et impulsion lors du choc élastique et inélastique sur le banc à coussin d'air

- Mesure avec deux barrières lumineuses et CASSY

P1.3.4.10

Principe de la fusée: conservation de l'impulsion et recul

Energie et impulsion lors du choc élastique et inélastique sur le banc à coussin d'air
- Mesure avec deux barrières lumineuses et CASSY (P1.3.4.8)

N° de cat.	Désignation	P1.3.4.8	P1.3.4.10
337 501	Banc à coussin d'air	1	1
337 53	Alimentation en air	1	1
667 8231	Unité de réglage de la puissance	1	1
337 46	Barrière lumineuse en U	2	
524 013	Sensor-CASSY 2	1	
524 220	CASSY Lab 2	1	
524 074	Timer S	1	
501 16	Câble de connexion, à 6 pôles, 1,50 m	2	
337 56	Mobile à réaction		1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN		1
524 060	Capteur de forces S, ±1 N		1
309 48	Fil de pêche		1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø		1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø		1
301 01	Noix Leybold		2
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	

Lors de la mise en évidence expérimentale de la conservation de l'impulsion, l'utilisation du banc à coussin d'air permet d'obtenir des résultats quantitativement bons. Par exemple, la «perte» d'énergie lors d'un choc élastique peut être maintenue très faible durant une expérimentation menée minutieusement.

Durant l'expérience P1.3.4.8, on mesure le temps Δt_i durant lequel les faisceaux de deux barrières lumineuses sont interrompus. Ces barrières lumineuses ont par exemple été excitées par deux mobiles placés sur le banc à coussin d'air, avant ou après un choc élastique ou inélastique. On étudie aussi bien les chocs entre un mobile en mouvement et un mobile au repos que ceux entre deux mobiles en mouvement. Le programme d'exploitation calcule et compare à la demande les vitesses

$$v_i = \frac{d}{\Delta t_i}$$

d : largeur des lamelles interruptrices

les impulsions

$$p_i = m_i \cdot v_i$$

m_i : masses des mobiles

et les énergies

$$E_i = \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot v_i^2$$

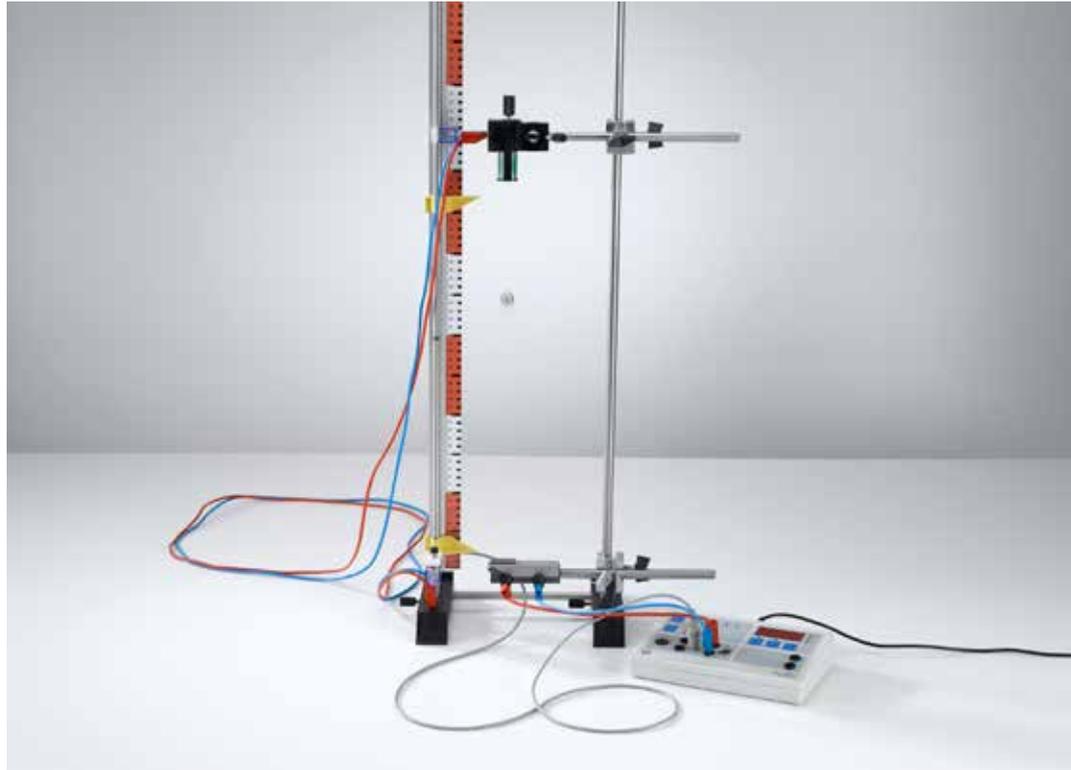
des mobiles avant et après le choc.

Pour étudier la relation entre réaction et conservation de l'impulsion, la force de réaction sur un mobile à réaction est calculée au cours de l'expérience P1.3.4.10 pour différentes sections de sortie d'air à l'aide d'un capteur de forces.

CHUTE LIBRE

P1.3.5.1

Chute libre: mesure du temps avec plaque de contact et compteur S



Chute libre: mesure du temps avec plaque de contact et compteur S (P1.3.5.1)

N° de cat.	Désignation	P1.3.5.1
336 23	Plaque de contact, grande	1
336 21	Aimant de maintien	1
336 25	Adaptateur pour aimant de maintien avec déclencheur	1
575 471	Compteur S	1
301 21	Embase multifonctionnelle MF	2
301 26	Tige 25 cm, 10 mm Ø	3
300 46	Tige 150 cm, 12 mm Ø	1
301 01	Noix Leybold	2
311 23	Règle avec curseurs	1
501 25	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, rouge	1
501 26	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, bleu	1
501 35	Câble d'expérimentation 32 A, 200 cm, rouge	1
501 36	Câble d'expérimentation 32 A, 200 cm, bleu	1

Pour étudier la chute libre, une bille d'acier est mise en contact avec un électroaimant. Son poids

$$F = m \cdot g$$

m : masse de la bille g : accélération de la pesanteur

la fait chuter de façon uniformément accélérée dès que l'électroaimant est éteint. Le frottement de l'air peut être négligé tant que la hauteur de chute ainsi que la vitesse finale ne sont pas trop élevées. On dit que la bille tombe librement.

Lors du relevé point par point de valeurs destinées à un diagramme distance - temps dans le cas de la chute libre, la dépendance des résultats de paramètres tels que la vitesse initiale ou la hauteur de chute ne peut être étudiée qu'à condition d'y consacrer beaucoup de temps. Ces études deviennent plus simples lorsque l'ensemble des mesures d'un diagramme distance-temps est tracé avec un ordinateur.

Au cours de l'expérience P1.3.5.1, la mesure électronique du temps est lancée dès que la bille est libérée par l'interruption du courant magnétique. Après une hauteur de chute h , la bille tombe sur une plaque de contact et arrête la mesure du temps t . Les mesures pour différentes hauteurs de chute sont reportées sous forme de couples de valeurs dans un diagramme distance - temps. Comme la bille est au repos au début des mesures, g peut être estimée d'après la relation:

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

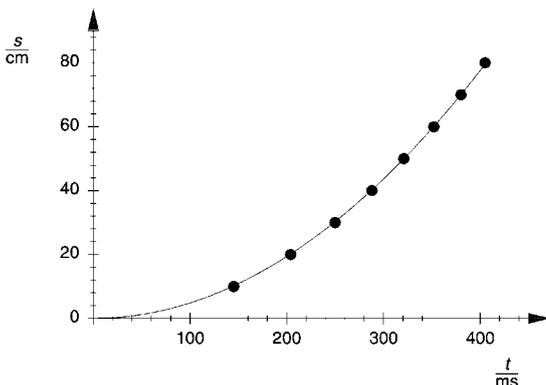


Diagramme distance-temps de la chute libre de la bille (P1.3.5.1)

CHUTE LIBRE

P1.3.5.3

Chute libre: Mesure multiple du temps avec une échelle g



Chute libre: Mesure multiple du temps avec une échelle g (P1.3.5.3)

N° de cat.	Désignation	P1.3.5.3
529 034	Échelle g	1
337 46	Barrière lumineuse en U	1
501 16	Câble de connexion, à 6 pôles, 1,50 m	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 220	CASSY Lab 2	1
524 074	Timer S	1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

Pour étudier la chute libre, une bille d'acier est mise en contact avec un électroaimant. Son poids

$$F = m \cdot g$$

m : masse de la bille g : accélération de la pesanteur

la fait chuter de façon uniformément accélérée dès que l'électroaimant est éteint. Le frottement de l'air peut être négligé tant que la hauteur de chute ainsi que la vitesse finale ne sont pas trop élevées. On dit que la bille tombe librement.

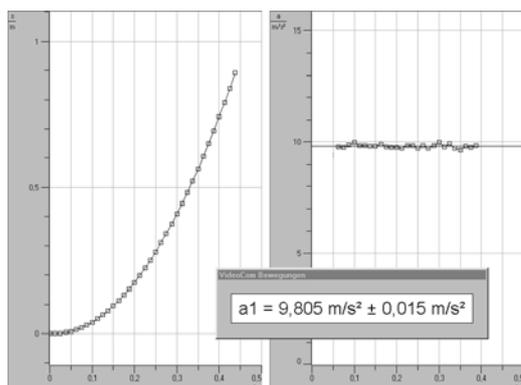
Lors du relevé point par point de valeurs destinées à un diagramme distance - temps dans le cas de la chute libre, la dépendance des résultats de paramètres tels que la vitesse initiale ou la hauteur de chute ne peut être étudiée qu'à condition d'y consacrer beaucoup de temps. Ces études deviennent plus simples lorsque l'ensemble des mesures d'un diagramme distance-temps est tracé avec un ordinateur.

Dans l'expérience P1.3.5.3, une échelle à plusieurs échelons passe devant une barrière lumineuse en U branchée à l'interface CASSY pour ainsi pouvoir mesurer les temps d'obscurcissement. La mesure est équivalente à une mesure pour laquelle un corps tombe en passant devant plusieurs barrières lumineuses équidistantes. La hauteur du corps en chute correspond à la largeur des échelons. Les données de mesure sont relevées puis exploitées avec le programme CASSY Lab. Les vitesses instantanées v se calculent d'après les temps d'obscurcissement et la largeur des échelons puis elles sont reportées dans un diagramme vitesse - temps v . Les points de mesure peuvent être décrits par une droite

$$v(t) = v_0 + g \cdot t$$

g : accélération de la pesanteur

où v_0 est la vitesse initiale de l'échelle lorsqu'elle passe devant la barrière lumineuse avec le premier échelon.



Path-time and acceleration-time diagrams of the falling body (P1.3.5.3)

JET OBLIQUE

P1.3.6.1

Tracé point par point de la trajectoire en fonction de la vitesse et de l'angle de tir

P1.3.6.2

Principe de superposition: comparaison entre le jet oblique et la chute libre



Principe de superposition: comparaison entre le jet oblique et la chute libre (P1.3.6.2)

N° de cat.	Désignation	P1.3.6.1	P1.3.6.2
336 56	Appareil de jet, grand	1	1
301 06	Pince de table	2	2
311 78	Mètre ruban 2 m	1	
300 76	Laborboy II (support élévateur)	1	
311 22	Règle verticale	1	
300 11	Socle	1	
649 42	Plateau 552 mm x 197 mm x 48 mm	1	1
688 108	Sable quarzeux, 1 kg	1	1
336 21	Aimant de maintien		1
521 231	Transformateur variable TBT 3/6/9/12 V		1
311 02	Règle métallique, 1 m		1
300 44	Tige 100 cm, 12 mm Ø		1
301 07	Pince de table simple		1
501 26	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, bleu		1
501 35	Câble d'expérimentation 32 A, 200 cm, rouge		1
501 36	Câble d'expérimentation 32 A, 200 cm, bleu		1

La trajectoire d'une bille qui a été lancée selon un angle de tir α et une vitesse de tir v_0 peut être établie selon le principe de superposition. Le mouvement est composé d'un mouvement à vitesse constante suivant la direction du tir et d'un mouvement de chute dirigé perpendiculairement vers le bas. Il résulte de cette superposition une parabole dont la hauteur et l'amplitude dépendent de l'angle et de la vitesse de tir.

Au cours de l'expérience P1.3.6.1, la courbe de vol de la bille d'acier est mesurée point par point avec une règle verticale. Pour cela, la règle verticale est placée à des distances données du point de tir. Ses deux index doivent être disposés de façon à ce que la bille d'acier passe entre les deux. La trajectoire correspond approximativement à une parabole. Les anomalies présentées par la forme parabolique sont dues au frottement de l'air.

Dans l'expérience P1.3.6.2, une deuxième bille est mise en contact avec un aimant de maintien de telle sorte que la première touche avec un mouvement à vitesse constante suivant la direction de tir. Ainsi, la chute libre de la seconde bille est déclenchée en même temps que le lancement de la première. On observe que les deux billes se rencontrent indépendamment de la vitesse de tir v_0 de la première bille et on obtient ainsi une mise en évidence expérimentale du principe de superposition.

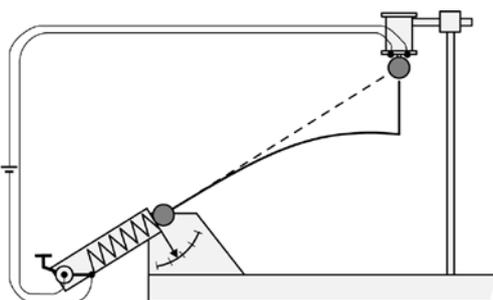


Schéma du montage pour comparer jet oblique et chute libre (P1.3.6.2)



MOUVEMENTS DE ROTATION

P1.4.1.1

Diagrammes distance-temps de mouvements de rotation - chronométrage avec le compteur

P1.4.1.2

Diagrammes distance-temps de mouvements de rotation - tracé et exploitation avec CASSY

Diagrammes distance-temps de mouvements de rotation - chronométrage avec le compteur (P1.4.1.1)

N° de cat.	Désignation	P1.4.1.1	P1.4.1.2
347 23	Modèle de rotation	1	1
337 46	Barrière lumineuse en U	1	
575 471	Compteur S	1	
501 16	Câble de connexion, à 6 pôles, 1,50 m	1	1
300 76	Laborboy II (support élévateur)	1	1
301 07	Pince de table simple	1	1
337 462	Barrière lumineuse combinée		1
524 013	Sensor-CASSY 2		1
524 220	CASSY Lab 2		1
524 074	Timer S		1
336 21	Aimant de maintien		1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø		1
300 11	Socle		1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		1

Pour l'étude quantitative de mouvements de rotation, le disque en plexiglas du modèle de rotation, qui fonctionne avec peu de frottements, est soumis à des mouvements de rotation uniformes ou uniformément accélérés. Pour déterminer la vitesse angulaire, on utilise deux barrières lumineuses dont le rayon lumineux est coupé par une lame interruptrice de 10° sur le disque rotatif. (La mesure du temps t pour un angle ω quelconque peut être lancée et arrêtée avec deux barrières lumineuses.) La vitesse moyenne

$$\omega = \frac{\varphi}{t}$$

est calculée. Si l'on ne dispose que d'une barrière lumineuse, on mesure le temps Δt durant lequel le faisceau lumineux est interrompu puis on calcule la vitesse angulaire instantanée

$$\omega = \frac{10^\circ}{\Delta t}$$

L'utilisation d'un système de mesure assisté par ordinateur, tel que CASSY, facilite l'étude de mouvements circulaires uniformément accélérés. Le mouvement de rotation est transmis à un capteur de mouvement, à l'aide d'un fil tendu entourant la circonférence du système en rotation, les signaux adaptés sont envoyés aux entrées de CASSY via l'adaptateur Timer S.

Durant l'expérience P1.4.1.1, la vitesse angulaire ω et l'accélération angulaire α sont introduites par analogie avec la vitesse et l'accélération de mouvements de translation. Pour cela, on étudie des mouvements de rotation uniformes et uniformément accélérés. Les résultats sont portés dans un diagramme vitesse - temps $\omega(t)$. L'accélération angulaire se déduit de la relation

$$\omega = \alpha \cdot t$$

pour un mouvement uniformément accéléré d'un disque rotatif partant d'une position de repos.

Dans l'expérience P1.4.1.2, les vitesses mesurées les unes après les autres durant l'étude de mouvements uniformes et uniformément accélérés sont ensuite représentées graphiquement sur l'écran.

CONSERVATION DU MOMENT CINÉTIQUE

P1.4.2.1

Conservation du moment cinétique lors d'un choc élastique et inélastique entre deux corps en rotation



Conservation du moment cinétique lors d'un choc élastique et inélastique entre deux corps en rotation (P1.4.2.1)

N° de cat.	Désignation	P1.4.2.1
347 23	Modèle de rotation	1
524 431	Barrière lumineuse M	2
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1

Les chocs entre deux corps en rotation peuvent être comparés aux chocs issus de mouvements de translation unidimensionnels, si les axes de rotation des corps sont parallèles entre eux et s'ils ne changent pas lors du choc. Ceci est garanti à chaque fois par les mesures effectuées avec le modèle de rotation. Le moment cinétique est donné sous la forme:

$$L = I \cdot \omega$$

I : moment d'inertie, ω : vitesse angulaire

D'après le principe de conservation du moment cinétique, la grandeur

$$L = I_1 \cdot \omega_1 + I_2 \cdot \omega_2$$

est la même avant et après le choc entre deux corps en rotation.

Au cours d'expérience P1.4.2.1, on étudie des chocs élastiques et inélastiques entre des corps en rotation. Pour déterminer la vitesse angulaire avant et après le choc entre les corps en rotation, on mesure le temps durant lequel les faisceaux lumineux de deux barrières lumineuses sont interrompus à l'aide du système d'acquisition CASSY.

FORCE CENTRIFUGE

P1.4.3.3
Force centrifuge exercée sur un corps en rotation - Mesure avec l'appareil à force centrifuge et CASSY



Force centrifuge exercée sur un corps en rotation - Mesure avec l'appareil à force centrifuge et CASSY (P1.4.3.3)

N° de cat.	Désignation	P1.4.3.3
524 068	Appareil à force centrifuge S	1
521 491	Alimentation CA/CC 0...12 V/3 A	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 220	CASSY Lab 2	1
524 074	Timer S	1
337 46	Barrière lumineuse en U	1
501 16	Câble de connexion, à 6 pôles, 1,50 m	1
301 06	Pince de table	1
300 02	Pied en V, petit	1
300 40	Tige 10 cm, 12 mm Ø	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

L'appareil à force centrifuge S permet l'analyse expérimentale de la force centrifuge F en fonction de la masse rotative m , de sa distance du centre rotatif et de la vitesse angulaire ω , confirmant ainsi la relation

$$F = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

r : rayon, ω : vitesse angulaire

de la force centrifuge.

Dans l'appareil à force centrifuge, la force centrifuge F agissant sur la masse rotative m est transmise par un système de levier et une pointe dans l'axe de rotation sur un ressort à lame. Sa déviation est mesurée électriquement par moyen de jauges extensiométriques. Dans la gamme de mesure en question, la déformation de la lame à ressorts est élastique et par conséquent proportionnelle à la force F .

Dans l'expérience P1.4.3.3 la relation

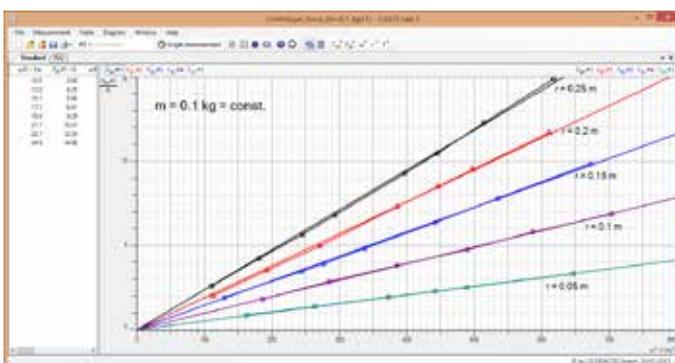
$$F \propto \omega^2$$

est dérivée directement de la forme parabolique de la courbe de mesure $F(\omega)$.

Les proportionalités

$$F \propto r, F \propto m$$

sont confirmées par enregistrement et évaluation des courbes de différents rayons orbitaux r et différentes masses m .



Force centrifuge F en fonction de la vitesse angulaire ω (P1.4.3.3)

MOUVEMENTS GYROSCOPIQUES

P1.4.4.3 Précession et nutation du gyroscope



Précession et nutation du gyroscope (P1.4.4.3)

N° de cat.	Désignation	P1.4.4.3
348 20	Gyroscope	1
342 63	Masses marquées de 50 g	2
524 082	Capteur de rotation S	1
337 468	Barrière lumineuse à réflexion	1
590 021	Double pince à ressort	1
524 074	Timer S	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 220	CASSY Lab 2	1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

Les gyroscopes effectuent en général des mouvements très compliqués car l'axe de rotation ne repose que sur un point d'appui et sa direction change constamment. Il y a une différence entre précession et nutation d'un gyroscope.

L'objet de l'expérience P1.4.4.3 est l'analyse de la précession d'un gyroscope. La fréquence de précession f_p est saisie à l'aide du capteur de rotation, celle de rotation f du disque du gyroscope par la barrière lumineuse à réflexion. Les données sont enregistrées par CASSY. La fréquence de précession f_p est déterminée quantitativement en fonction de la force attaquante, c'est-à-dire du couple de rotation M et de la fréquence de rotation f . La relation

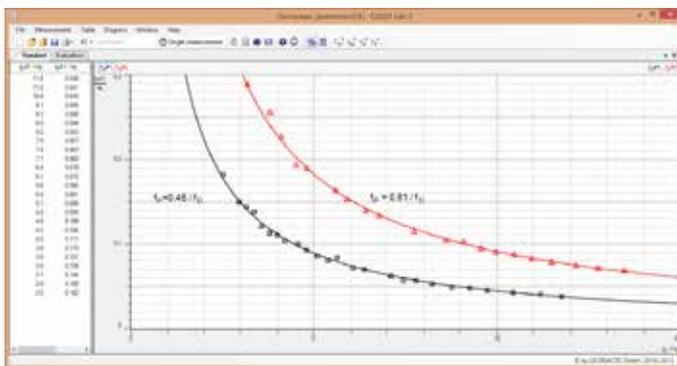
$$\omega_p = \frac{M}{I} \cdot \frac{1}{\omega}$$

est valable pour les vitesses angulaires correspondantes ω_p et ω pour un moment d'inertie I connu du gyroscope autour de son axe de symétrie.

L'objet de l'expérience est l'étude de la nutation d'un gyroscope sans forces. La fréquence de nutation f_N est saisie par le capteur de rotation, celle de rotation f du disque du gyroscope par la barrière lumineuse à réflexion. Les données sont enregistrées par CASSY. La fréquence de nutation f_N est déterminée quantitativement en fonction de la fréquence de rotation f . La relation

$$\omega_N = \frac{I \cdot \omega}{I_\perp}$$

est valable pour les vitesses angulaires correspondantes ω_p et ω à un moment d'inertie connu I du gyroscope autour de son axe de symétrie (axe de rotation du disque du gyroscope) et I_\perp autour du point de rotation (point d'appui).



Précession du gyroscope (P1.4.4.3)

MOMENT D'INERTIE

- P1.4.5.1
Définition du moment d'inertie
- P1.4.5.2
Moment d'inertie et forme du corps
- P1.4.5.3
Vérification du théorème de Steiner



Définition du moment d'inertie (P1.4.5.1)

N° de cat.	Désignation	P1.4.5.1	P1.4.5.2	P1.4.5.3
347 801	Axe de torsion	1	1	1
300 02	Pied en V, petit	1	1	1
313 27	Chronomètre manuel, 60s/0,2s	1	1	1
347 81	Cylindres pour l'axe de torsion, jeu		1	
347 82	Sphère pour l'axe de torsion		1	
347 83	Disque pour l'axe de torsion			1



Vérification du théorème de Steiner (P1.4.5.3)

Pour un corps rigide quelconque, dont les masses élémentaires m_i sont à une distance r_i de l'axe de rotation, on a le moment d'inertie

$$I = \sum m_i \cdot r_i^2$$

Pour une masse ponctuelle m placée sur un rail circulaire de rayon r , on a

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

Le moment d'inertie est déterminé d'après la période d'oscillation d'un axe de torsion sur lequel est placé le corps étudié et qui est fixé élastiquement au bâti avec un ressort en volute. On fait entrer le système en oscillations harmoniques. On calcule le moment d'inertie du corps étudié d'après la période d'oscillation T et connaissant la grandeur directionnelle angulaire D avec la relation

$$I = D \cdot \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2$$

L'expérience P1.4.5.1 consiste à déterminer le moment d'inertie d'une masse ponctuelle en fonction de l'écart r à l'axe de rotation. Pour cela, on place une baguette avec deux masses marquées identiques, en travers sur l'axe de torsion. Les centres de gravité des deux masses marquées se trouvent à la même distance r de l'axe de rotation, ceci permettant au système d'osciller sans balourd.

Durant l'expérience P1.4.5.2, on compare entre eux les moments d'inertie du cylindre creux, du cylindre plein et de la sphère pleine. On dispose pour cela de deux cylindres pleins de même masse mais de rayons différents, puis d'un cylindre creux ayant même masse et même rayon qu'un des cylindres pleins et enfin d'une sphère pleine ayant le même moment d'inertie qu'un des cylindres pleins.

Dans l'expérience P1.4.5.3, on vérifie expérimentalement le théorème de Steiner sur l'exemple d'un disque plat. On mesure pour cela les moments d'inertie I_A du disque plat pour différents écartements a entre l'axe de rotation et le centre de gravité et on les compare avec le moment d'inertie I_S de l'axe du centre de gravité. La relation

$$I_A - I_S = M \cdot a^2$$

CONSERVATION DE L'ÉNERGIE

P1.4.6.1
Roue de Maxwell

P1.4.6.2
Roue de Maxwell - tracé et évaluation avec capteur à ultrason



Roue de Maxwell (P1.4.6.1)

N° de cat.	Désignation	P1.4.6.1	P1.4.6.2
331 22	Roue de Maxwell	1	1
337 46	Barrière lumineuse en U	1	
501 16	Câble de connexion, à 6 pôles, 1,50 m	1	
575 471	Compteur S	1	
336 25	Adaptateur pour aimant de maintien avec déclencheur	1	
311 23	Règle avec curseurs	1	1
300 11	Socle	1	1
301 25	Bloc de noix	1	
301 21	Embase multifonctionnelle MF	2	2
301 27	Tige 50 cm, 10 mm Ø	2	3
300 44	Tige 100 cm, 12 mm Ø	2	2
301 01	Noix Leybold	4	7
524 0701	Capteur de déplacement à ultrasons S		1
501 11	Câble rallonge, à 15 pôles		1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN		1

Selon le principe de conservation de l'énergie, la somme de toutes les énergies d'un système isolé est constante au cours du temps. Dans ce système, l'énergie peut prendre différentes formes (l'énergie potentielle peut se transformer en énergie cinétique), tout en restant constante. En pratique (cas idéal inclus), cette énergie semble ne pas être constante lors des expériences. Ceci est dû aux formes d'énergie non prises en compte lors de processus de transformation d'une forme d'énergie à une autre; par exemple l'énergie de frottement.

Dans l'expérience P1.4.6.1, on étudie la conservation de l'énergie à l'aide de la roue de Maxwell. Lors de cette expérience, l'énergie potentielle E_{pot} est transformée en énergie cinétique E_{kin} composée d'un mouvement linéaire E_{trans} et d'un mouvement de rotation E_{rot} . Pour des hauteurs différentes, les temps et les vitesses sont mesurées. Les valeurs mesurées permettent ensuite de déterminer le moment d'inertie de la roue de Maxwell. La valeur de ce moment d'inertie permet de calculer l'accélération gravitationnelle.

Dans l'expérience P1.4.6.2, on étudie la conservation de l'énergie à l'aide de la roue de Maxwell. Un capteur à ultrasons mesure la position et la vitesse de la roue, ce qui permet de calculer l'énergie cinétique.



PENDULE SIMPLE ET PENDULE COMPOSÉ

P1.5.1.1
Détermination de l'accélération terrestre avec un pendule mathématique

P1.5.1.7
Détermination de l'accélération terrestre avec un pendule mathématique
- Mesure avec barrière lumineuse

Détermination de l'accélération terrestre avec un pendule mathématique - Mesure avec barrière lumineuse (P1.5.1.7)

N° de cat.	Désignation	P1.5.1.1	P1.5.1.7
340 851	Masse marquée, 50 g	3	3
686 51	Fil	1	1
314 04	Crochet de suspension, enfichable	1	1
311 78	Mètre ruban 2 m	1	1
LDS 00001	Chronomètre manuel, numérique	1	
301 21	Embase multifonctionnelle MF	2	2
301 26	Tige 25 cm, 10 mm Ø	1	1
301 27	Tige 50 cm, 10 mm Ø	1	1
301 25	Bloc de noix	1	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN		1
524 431	Barrière lumineuse M		1
688 808	Tige, 10 x 223 mm, avec filetage M6		1
300 02	Pied en V, petit		1

On appelle pendule mathématique une masse m considérée comme ponctuelle attachée à un fil sans masse de longueur s . Lors de petites déviations, il oscille sous l'action de la pesanteur avec une période d'oscillation de

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{s}{g}}$$

L'accélération de la pesanteur pourrait ainsi être déterminée très précisément avec un pendule mathématique en mesurant la période d'oscillation et la longueur du pendule.

Dans le cas d'un pendule physique, on considère la répartition de la masse d'un corps rigide. Le calcul de la période d'oscillation T est basé sur le moment d'inertie J autour du point de suspension, la masse m et la distance s du point de suspension par rapport au centre de masse.

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J}{mgs}}$$

La longueur réduite du pendule l_R est la longueur d'un pendule mathématique de la même période d'oscillation. Souvent, la longueur du pendule réduit ne peut pas être déterminée avec la précision souhaitée car la détermination exacte du moment d'inertie ou du centre de gravité est difficile. Dans le cas du pendule de réversion, la répartition des masses est modifiée de sorte que les périodes d'oscillation des deux axes de rotation soient les mêmes. Par conséquent, il est clair que la longueur réduite du pendule l_R correspond à la distance entre les deux axes de rotation et est donc connue avec une grande précision.

Dans l'expérience P1.5.1.1, on utilise un poids sur une fil pour déterminer l'accélération de la pesanteur. Comme la masse du poids est considérablement plus élevée que celle du fil auquel il pend, le pendule peut être considéré comme une bonne approximation d'un pendule mathématique. Pour affiner la précision des mesures, on compte plusieurs oscillations. L'erreur commise pour l'accélération de la pesanteur dépend surtout de la précision avec laquelle la longueur du pendule a été estimée.

Dans l'expérience P1.5.1.7, on utilise un poids sur une fil pour déterminer l'accélération de la pesanteur. Comme la masse du poids est considérablement plus élevée que celle du fil auquel il pend, le pendule peut être considéré comme une bonne approximation d'un pendule mathématique. La mesure est réalisée avec une barrière lumineuse et CASSY. L'erreur commise pour l'accélération de la pesanteur dépend surtout de la précision avec laquelle la longueur du pendule a été estimée.

PENDULE SIMPLE ET PENDULE COMPOSÉ

P1.5.1.3

Oscillation d'un pendule composé et détermination de l'accélération de la pesanteur

- Mesure avec capteur de rotation

P1.5.1.6

Pendule à accélération de la pesanteur variable (pendule à g variable)



Oscillation d'un pendule composé et détermination de l'accélération de la pesanteur - Mesure avec capteur de rotation (P1.5.1.3)

N° de cat.	Désignation	P1.5.1.3	P1.5.1.6
346 20	Pendule composé	1	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1	
524 082	Capteur de rotation S	1	1
301 21	Embase multifonctionnelle MF	2	2
301 26	Tige 25 cm, 10 mm Ø	1	2
524 013	Sensor-CASSY 2		1
524 220	CASSY Lab 2		1
301 27	Tige 50 cm, 10 mm Ø		1
301 01	Noix Leybold		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		1

Dans le cas d'un pendule physique, on considère la répartition de la masse d'un corps rigide. Le calcul de la période d'oscillation T est basé sur le moment d'inertie J autour du point de suspension, la masse m et la distance s du point de suspension par rapport au centre de masse.

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J}{mgs}}$$

La longueur réduite du pendule l_R est la longueur d'un pendule mathématique de la même période d'oscillation. Souvent, la longueur du pendule réduit ne peut pas être déterminée avec la précision souhaitée car la détermination exacte du moment d'inertie ou du centre de gravité est difficile. Dans le cas du pendule de réversion, la répartition des masses est modifiée de sorte que les périodes d'oscillation des deux axes de rotation soient les mêmes. Par conséquent, il est clair que la longueur réduite du pendule l_R correspond à la distance entre les deux axes de rotation et est donc connue avec une grande précision.

Dans l'expérience P1.5.1.3 on étudie l'oscillation d'un pendule à tige qui représente un pendule de physique simple. L'oscillation du pendule en fonction du temps est saisie par le capteur de rotation S. On compare l'angle $\alpha(t)$, la vitesse $\omega(t)$ et l'accélération $\sigma(t)$. De plus, on détermine la longueur du pendule réduite en fonction de la période de l'oscillation T . L'expérience se consacre à l'étude de la période d'oscillation T en fonction de l'amplitude A d'une oscillation. L'oscillation d'un pendule est approximativement harmonique pour des déviations petites et la période d'oscillation est indépendante de l'amplitude. Cette approximation n'est pas valable pour des déviations grandes, la période d'oscillation augmente avec l'augmentation de l'amplitude. Au cours de l'expérience on utilise le pendule à tige comme pendule réversible pour déterminer l'accélération de la pesanteur. Le pendule est monté sur deux points d'appui opposés et mis en oscillation. On modifie la période d'oscillation à l'aide de deux masses coulissantes. Lorsque le pendule est correctement ajusté, il oscille autour des deux portées avec la même période d'oscillation T . La longueur du pendule réduite l , correspond à la distance des deux portées et permet une détermination très précise. L'accélération de la pesanteur est calculée de la longueur du pendule et la période d'oscillations.

Dans l'expérience P1.5.1.6 on monte et étudie un pendule à accélération de la pesanteur variable (pendule g variable). En renversant le plan d'oscillation de la verticale, seulement une partie de l'accélération de la pesanteur fait de l'effet au pendule. Conformément aux inclinaisons on reçoit des périodes d'oscillation plus ou moins longues. L'expérience consiste à l'étude de la période d'oscillation en fonction de l'angle d'inclinaison. En plus, on simule l'accélération de la pesanteur sur des corps célestes différents.



OSCILLATIONS HARMONIQUES

P1.5.2.1

Oscillations d'un pendule à ressort et détermination de la période d'oscillation d'un pendule à ressort en fonction de la masse oscillante - Mesure avec CASSY

Oscillations d'un pendule à ressort et détermination de la période d'oscillation d'un pendule à ressort en fonction de la masse oscillante - Mesure avec CASSY (P1.5.2.1)

N° de cat.	Désignation	P1.5.2.1
352 10	Ressort à boudin 3 N/m	1
342 63	Masses marquées de 50 g	5
336 21	Aimant de maintien	1
337 462	Barrière lumineuse combinée	1
337 464	Roue à rayons combinée	1
524 074	Timer S	1
501 16	Câble de connexion, à 6 pôles, 1,50 m	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 220	CASSY Lab 2	1
300 01	Pied en V, grand	1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	1
300 46	Tige 150 cm, 12 mm Ø	1
301 01	Noix Leybold	2
301 08	Noix avec crochet	1
309 48	Fil de pêche	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

Des oscillations peuvent apparaître si un corps est dévié de sa position d'équilibre stable. L'oscillation est dite harmonique lorsque la force de renvoi F proportionnelle à la déviation x par rapport à la position de repos vaut:

$$F = D \cdot x$$

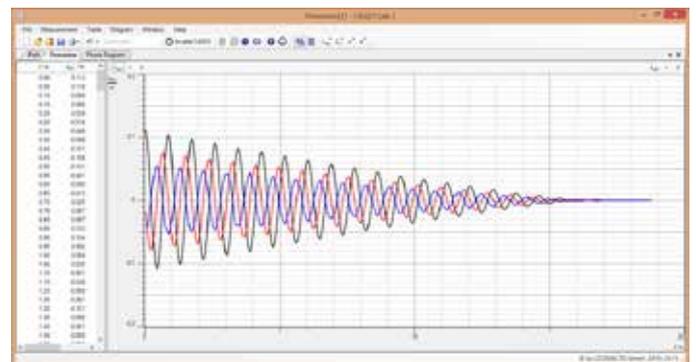
D : constante d'élasticité

Les oscillations d'un pendule à ressort servent pour cela fréquemment d'exemple classique.

Au cours de l'expérience P1.5.2.1, on trace en fonction du temps les oscillations harmoniques d'un pendule à ressort avec le capteur pour le transducteur de mouvement et le système d'acquisition CASSY. Pour l'exploitation, on compare sur l'écran les grandeurs oscillantes distance x , vitesse v et accélération a entre elles. Elles peuvent être représentées au choix en fonction du temps t et sous forme de diagramme de phases. On trace puis exploite les oscillations d'un pendule à ressort pour différentes masses m suspendues. La relation

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{D}{m}}$$

est confirmée pour la période d'oscillation.

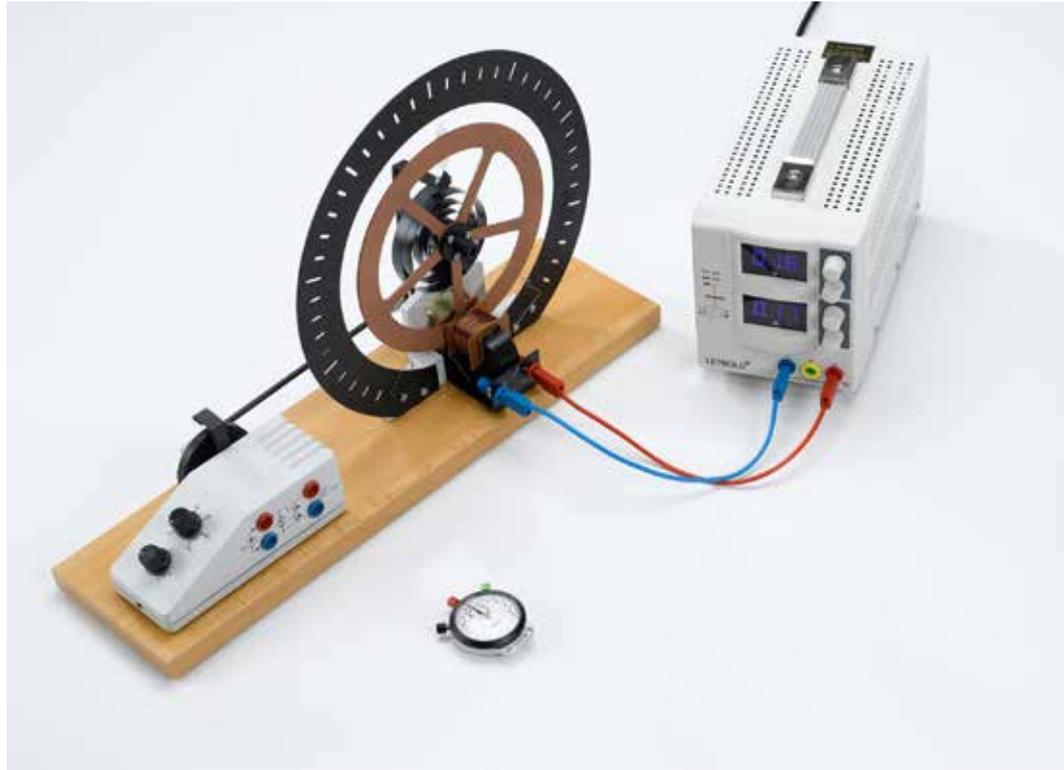


Path, velocity and acceleration on the pendulum (P1.5.2.1)

APPAREIL DE POHL

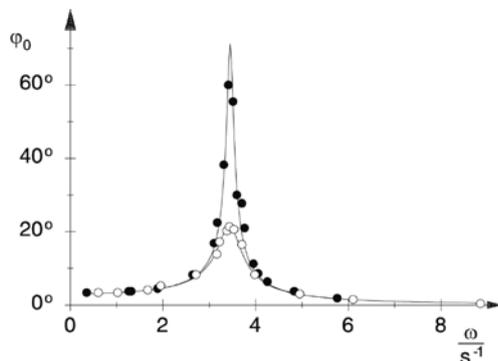
P1.5.3.1
Oscillations de torsion libres -
Mesure avec le chronomètre manuel

P1.5.3.2
Oscillations de torsion forcées -
Mesure avec le chronomètre manuel



Oscillations de torsion libres - Mesure avec le chronomètre manuel (P1.5.3.1)

N° de cat.	Désignation	P1.5.3.1	P1.5.3.2
346 00	Pendule de Pohl	1	1
521 546	Alimentation CC 0...16 V/0...5 A	1	1
313 27	Chronomètre manuel, 60s/0,2s	1	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1	2
562 793	Adaptateur secteur pour pendule de Pohl		1
531 120	Multimètre LDanalog 20		1



Courbes de résonance pour deux amortissements différents (P1.5.3.2)

L'appareil de Pohl sert à l'étude d'oscillations de torsion harmoniques libres ou forcées. Un frein à courants de Foucault amortit plus ou moins ces oscillations selon le courant choisi. Pour les oscillations forcées, le pendule de torsion est excité par un excentrique entraîné par un moteur.

Le système de saisie des valeurs mesurées CASSY assisté par ordinateur se prête tout à fait au tracé et à l'exploitation des oscillations d'un pendule de torsion. Les multiples possibilités d'exploitation permettent une comparaison exhaustive entre théorie et réalité. Les données tracées peuvent par exemple être représentées dans des diagrammes distance - temps, vitesse - temps, accélération - temps ou dans un diagramme de phases (diagramme distance - vitesse).

Les oscillations de torsion de la forme

$$\varphi(t) = \varphi_0 \cdot \cos \omega t \cdot e^{-\delta t} \text{ avec } \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

ω_0 : fréquence propre du pendule de torsion

font l'objet de la expérience P1.5.3.1. Pour faire la différence entre régime oscillatoire et régime amorti, on fait varier la constante d'amortissement Δ et on cherche le courant I_0 correspondant au cas limite apériodique. Dans le régime oscillatoire, on détermine la pulsation ω pour différents amortissements d'après la période d'oscillation T et la constante d'atténuation ω , à l'aide du rapport

$$\left| \frac{\varphi_{n+1}}{\varphi_n} \right| = e^{-\delta \cdot \frac{T}{2}}$$

entre deux amplitudes d'oscillation successives. La fréquence propre ω_0 est calculée d'après la relation

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \delta^2$$

Au cours de l'expérience P1.5.3.2, le pendule de torsion est amené à des oscillations de fréquence ω par un moment de torsion variant harmoniquement. Pour représenter le comportement de résonance, les amplitudes d'oscillations déterminées pour différents amortissements sont portées en fonction de ω et comparées avec la courbe théorique

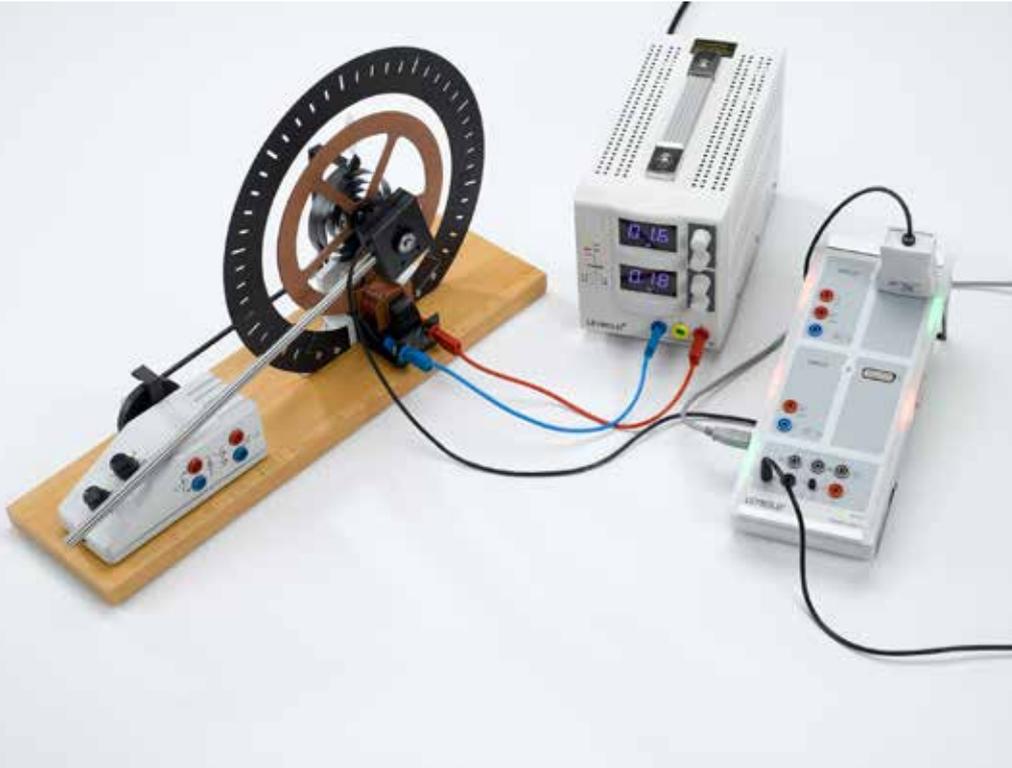
$$\varphi_0 = \frac{M_0}{I} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \delta^2 \cdot \omega^2}}$$

I : moment d'inertie du pendule de torsion

APPAREIL DE POHL

P1.5.3.3
Oscillations de torsion libres -
tracé avec CASSY

P1.5.3.4
Oscillations de torsion forcées
harmoniques et chaotiques -
tracé avec CASSY



Oscillations de torsion libres - tracé avec CASSY (P1.5.3.3)

N° de cat.	Désignation	P1.5.3.3	P1.5.3.4
346 00	Pendule de Pohl	1	1
521 546	Alimentation CC 0...16 V/0...5 A	1	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1	1
524 220	CASSY Lab 2	1	1
524 082	Capteur de rotation S	1	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1	2
562 793	Adaptateur secteur pour pendule de Pohl		1
531 120	Multimètre LDanalog 20		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1

L'appareil de Pohl sert à l'étude d'oscillations de torsion harmoniques libres ou forcées. Un frein à courants de Foucault amortit plus ou moins ces oscillations selon le courant choisi. Pour les oscillations forcées, le pendule de torsion est excité par un excentrique entraîné par un moteur.

Le système de saisie des valeurs mesurées CASSY assisté par ordinateur se prête tout à fait au tracé et à l'exploitation des oscillations d'un pendule de torsion. Les multiples possibilités d'exploitation permettent une comparaison exhaustive entre théorie et réalité. Les données tracées peuvent par exemple être représentées dans des diagrammes distance - temps, vitesse - temps, accélération - temps ou dans un diagramme de phases (diagramme distance - vitesse).

Les oscillations de torsion libres harmoniques de forme générale

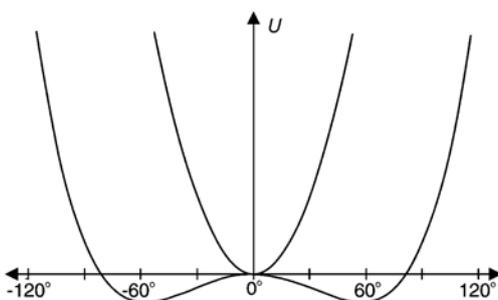
$$\varphi(t) = A \cdot e^{-\delta t} \sin(\omega t + \psi)$$

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

avec ω_0 : fréquence propre du pendule de torsion

font l'objet de l'expérience P1.5.3.3. L'étude s'effectue en fonction de la déviation initiale $\vartheta(0)$ et de la vitesse initiale $\omega(0)$. On varie en outre la constante d'atténuation Δ et on cherche le courant I_0 correspondant au régime critique aperiodique.

Pour étudier le passage des oscillations forcées harmoniques aux oscillations chaotiques, le moment de rappel linéaire exercé sur le pendule de torsion est modifié de façon adéquate au cours de l'expérience P1.5.3.4 en ajoutant une masse marquée supplémentaire. Le moment de rappel correspond désormais à un potentiel ayant deux minima, c'est-à-dire deux positions d'équilibre. Si le pendule est excité à fréquence constante, il peut osciller autour du minimum gauche, du minimum droit ou entre les deux minima. Pour des fréquences fixées, on ne peut pas prévoir quand le pendule va changer de minimum. On dit que le pendule oscille chaotiquement.



Energie potentielle du pendule double, avec et sans masse supplémentaire (P1.5.3.4)

COUPLAGE D'OSCILLATIONS

P1.5.4.1

Pendules couplés -

Mesure avec le chronomètre manuel



Pendules couplés - Mesure avec le chronomètre manuel (P1.5.4.1)

N° de cat.	Désignation	P1.5.4.1
346 45	Pendule double	1
300 02	Pied en V, petit	2
300 44	Tige 100 cm, 12 mm Ø	2
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø	1
301 01	Noix Leybold	4
460 97	Règle métallique graduée, 0,5 m	1
313 27	Chronomètre manuel, 60s/0,2s	1

Deux pendules couplés oscillent en phase avec une pulsation ω_+ , lorsqu'ils ont été déviés de leur position de repos dans la même direction. Si le second pendule est dévié dans la direction opposée, alors les pendules oscillent en opposition de phase avec une pulsation ω_- . Si l'on ne dévie qu'un seul pendule, une oscillation couplée de pulsation

$$\omega = \frac{\omega_+ + \omega_-}{2}$$

est créée, pour laquelle l'énergie d'oscillation est transmise çà et là entre les deux pendules. Le premier pendule s'immobilise après un certain temps alors qu'au même instant, le second pendule atteint son amplitude la plus importante. Le même processus se répète ensuite inversement. Le temps qui s'écoule d'un point d'arrêt d'un pendule au suivant est appelé période de balancement T_S . On a

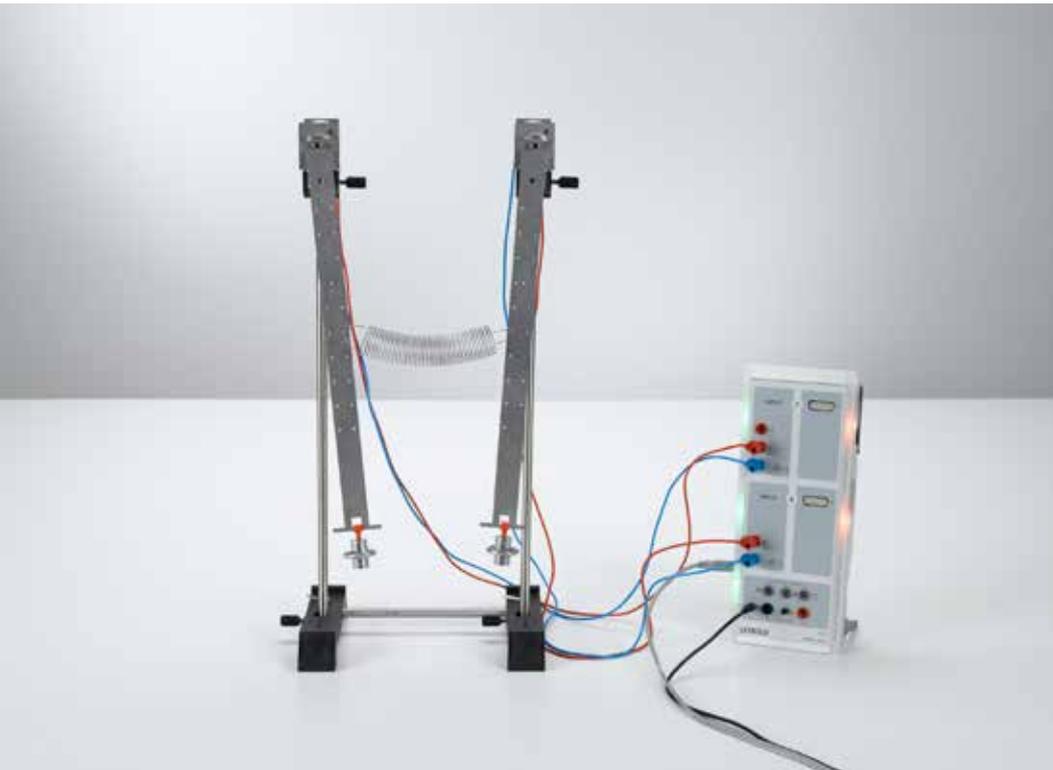
$$\omega_S = \omega_+ - \omega_-$$

pour la pulsation (fréquence de battement) correspondante.

L'observation d'oscillations en phase, en opposition de phase et couplées fait l'objet de l'expérience P1.5.4.1. Les pulsations ω_+ , ω_- , ω_S et ω sont calculées d'après les périodes d'oscillation T_+ , T_- , T_S et T chronométrées manuellement, puis elles sont comparées entre elles.

COUPLAGE D'OSCILLATIONS

P1.5.4.4
Pendules couplés -
tracé et évaluation avec CASSY



Pendules couplés - tracé et évaluation avec CASSY (P1.5.4.4)

N° de cat.	Désignation	P1.5.4.4
346 03	Pendule à barre, paire	1
340 85	Masses marquées de 50 g, jeu de 6	1
314 04	Crochet de suspension, enfichable	2
352 10	Ressort à boudin 3 N/m	1
579 43	Moteur CC et génératrice tachymétrique, STE 4/19/50	2
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 220	CASSY Lab 2	1
301 25	Bloc de noix	2
301 26	Tige 25 cm, 10 mm Ø	1
301 27	Tige 50 cm, 10 mm Ø	2
301 21	Embase multifonctionnelle MF	2
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	2
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

Deux pendules (P1.5.4.4) couplés oscillent en phase avec la fréquence f_1 s'ils ont été déviés avec le même écartement de leur position de repos. Si le deuxième pendule est dévié dans la direction opposée, les pendules oscillent alors en opposition de phase avec la fréquence f_2 . Si on ne dévie qu'un seul pendule, une oscillation couplée avec la fréquence

$$f_n = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

est alors créée, l'énergie d'oscillation étant transmise ici dans un mouvement de va-et-vient entre les deux pendules. Le premier pendule s'immobilise après un certain temps alors qu'au même instant, le second pendule atteint son amplitude la plus importante. Le temps qui s'écoule d'un point d'arrêt d'un pendule au suivant est appelé T_s . Pour la fréquence de battement correspondante, on a

$$f_s = |f_1 - f_2|$$

ONDES TRANSVERSALES ET LONGITUDINALES

P1.6.1.3
Etude des vibrations de résonance sur le modèle de ressort à lame et la détermination de la longueur d'onde

P1.6.1.4
Génération de ondes stationnaires d'une corde et la détermination de la longueur d'onde

P1.6.1.5
Génération de ondes stationnaires dans un ressort à boudin et la détermination de la longueur d'onde



Génération de ondes stationnaires dans un ressort à boudin et la détermination de la longueur d'onde (P1.6.1.5)

N° de cat.	Désignation	P1.6.1.3	P1.6.1.4	P1.6.1.5
346 54	Modèle de résonance à ressorts à lame	1		
587 09	Oscillateur	1	1	1
522 561	Générateur de fonctions P	1	1	1
311 78	Mètre ruban 2 m	1	1	
501 33	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, noir	2	2	2
309 50	Fil de démonstration		1	
340 921	Poulie de 100 mm Ø, enfichable		1	
683 10	Masse marquée, 0,1 kg		1	
683 11	Masse marquée, 0,2 kg		1	
300 01	Pied en V, grand	2		1
300 44	Tige 100 cm, 12 mm Ø		2	1
301 01	Noix Leybold		2	2
301 25	Bloc de noix	1		
352 11	Ressort à boudin 2,7 N/m			1
311 22	Règle verticale			1
300 11	Socle			1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø			1

Une onde se forme lorsque des systèmes vibrants couplés pré-sentent une onde similaire l'un à la suite de l'autre. Elle peut se présenter par exemple sous la forme d'une onde transversale sur une corde élastique ou sous la forme d'une onde longitudinale le long d'un ressort à boudin. La vitesse de propagation d'un état vibratoire - la vitesse de phase v - est liée à la fréquence d'oscillation f et à la longueur d'onde λ par la relation

$$v = \lambda \cdot f$$

Si la corde ou le ressort à boudin est fixé aux deux extrémités, il y a réflexion en ces deux extrémités. C'est ainsi qu'il y a superposition de l'onde émise et de l'onde réfléchi. Suivant la longueur s de la corde, il y a des fréquences précises pour lesquelles la superposition des ondes forme un modèle d'oscillation stationnaire - ondes stationnaires. L'écart entre deux ventres de vibration ou deux ventres de vibration d'une onde stationnaire correspond à la même demi-longueur d'onde. Les extrémités attachées correspondent à des noeuds de vibration. On a pour une onde stationnaire avec n ventres de vibration

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

Elle est excitée à la fréquence

$$f_n = n \cdot \frac{v}{2s}$$

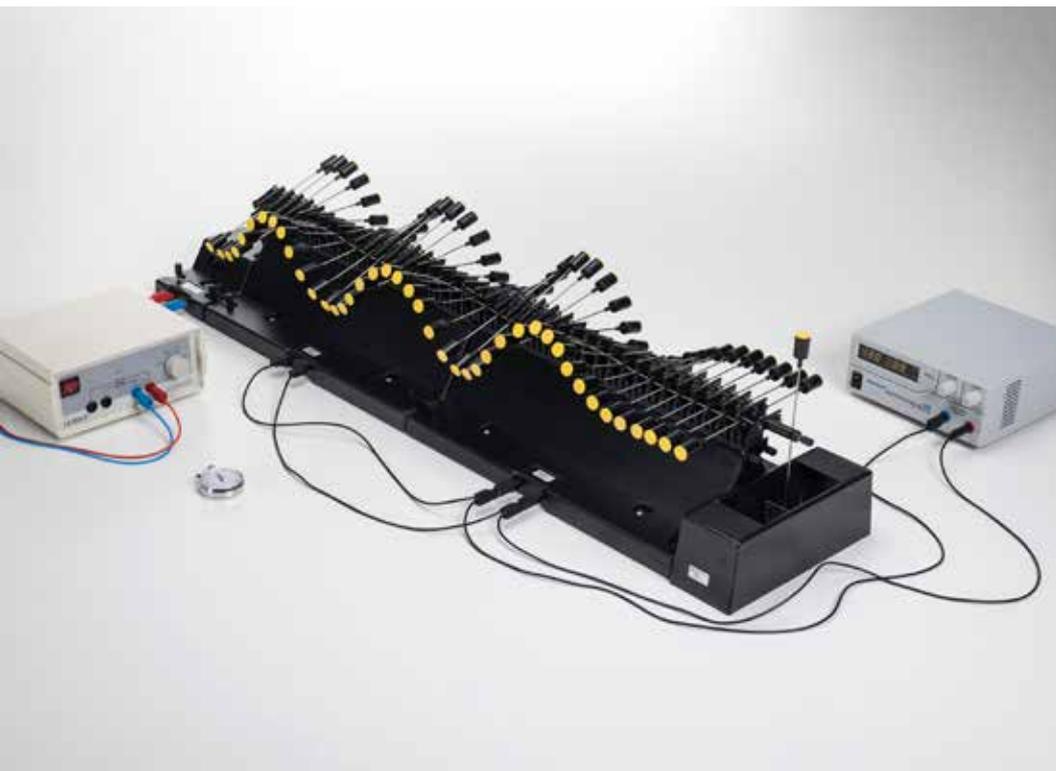
Dans l'expérience P1.6.1.3, on excite le modèle de ressort à lame avec différentes fréquences f afin d'en étudier la résonance. Les longueurs d'onde λ des oscillations peuvent ensuite être déterminées.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

c : vitesse de propagation

Dans l'expérience P1.6.1.4, on génère une onde stationnaire le long d'une corde. En fixant une extrémité de la corde et en faisant vibrer l'autre dans un mouvement de va-et-vient, l'onde générée est réfléchi au point fixe et revient en sens inverse. De cette manière, certains points sur la corde, les noeuds, ne vibrent pas tandis que d'autres, les ventres, vibrent avec une forte amplitude.

Dans l'expérience P1.6.1.5, on génère une onde stationnaire sur un ressort à boudin. En fixant une extrémité du ressort et en faisant osciller son autre extrémité dans un mouvement de va-et-vient, l'onde générée est réfléchi au point fixe et revient en sens inverse. De cette manière, il y a des points du ressort qui n'oscillent pas et d'autres qui oscillent.



SCOPONDE

P1.6.2.1

Longueur d'onde, fréquence d'oscillation et vitesse de phase pour des ondes progressives

P1.6.2.2

Longueur d'onde et fréquence d'oscillation pour des ondes stationnaires

Longueur d'onde, fréquence d'oscillation et vitesse de phase pour des ondes progressives (P1.6.2.1)

N° de cat.	Désignation	P1.6.2.1	P1.6.2.2
401 20	Scoponde, module de base 1	2	2
401 22	Module d'excitation pour le scoponde	1	1
401 23	Module amortisseur pour le scoponde	1	1
401 24	Frein pour le scoponde	2	2
521 231	Transformateur variable TBT 3/6/9/12 V	1	1
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A	1	1
313 27	Chronomètre manuel, 60s/0,2s	1	1
311 78	Mètre ruban 2 m	1	1
501 451	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, noirs, paire	1	1
501 461	Câbles d'expérimentation 19 A, 100 cm, noirs, paire	1	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1	1

L'appareil «scoponde - générateur d'ondes modulaire» permet le montage d'un générateur d'ondes à torsion horizontale, la taille et l'équipement pouvant être choisis librement dans les limites du système. Les modules comportent chacun 21 pendules qui sont placés de façon à pouvoir tourner sur des couteaux ayant le même axe. Ils sont couplés de manière élastique de part et d'autre de l'axe, de sorte que la déviation d'un pendule se propage sous forme d'onde comme perturbation le long de l'appareil.

Au cours de l'expérience P1.6.2.1, la relation

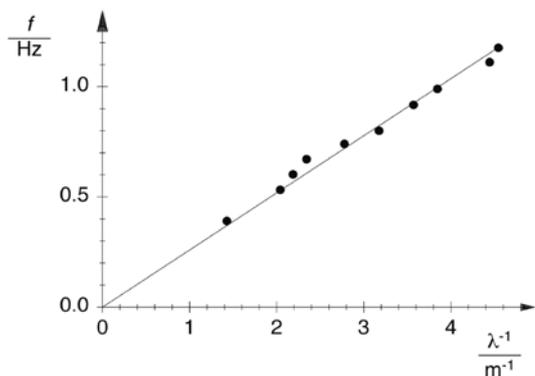
$$v = \lambda \cdot f$$

liant longueur d'onde λ , fréquence f et vitesse de phase v est vérifiée explicitement. On mesure pour cela avec un chronomètre et pour différentes longueurs d'onde le temps t mis par une phase quelconque de l'onde pour se propager sur une distance définie. La vitesse de phase

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

est ensuite calculée. L'onde est ensuite «gelée» à l'aide d'un frein électromagnétique pour mesurer la longueur d'onde λ . La fréquence se déduit de la période d'oscillation déterminée avec le chronomètre.

Avec l'expérience P1.6.2.2, on peut démontrer les principaux phénomènes de propagation d'ondes linéaires transversales. Parmi ces phénomènes, on compte notamment la formation d'ondes stationnaires par réflexion sur une extrémité attachée ou libre.



Relation entre la fréquence et la longueur d'onde en cas d'onde progressive (P1.6.2.1)

ONDES À POLARISATION
CIRCULAIRE D'UNE CORDE

P1.6.3.1
Etude des ondes d'une corde à polarisation circulaire dans le dispositif expérimental de Melde

P1.6.3.2
Détermination de la vitesse de phase des ondes d'une corde à polarisation circulaire dans le dispositif expérimental de Melde



Etude des ondes d'une corde à polarisation circulaire dans le dispositif expérimental de Melde (P1.6.3.1)

N° de cat.	Désignation	P1.6.3.1	P1.6.3.2
401 03	Appareil à ondes transversales	1	1
311 78	Mètre ruban 2 m	1	1
451 281	Stroboscope		1
315 05	Balance d'enseignement et de laboratoire 311		1

Dans le dispositif expérimental de Melde, des ondes à polarisation circulaire sont produites le long d'une corde de longueur s connue à l'aide d'un excentrique entraîné par un moteur. La force de tension F de la corde variera jusqu'à ce qu'apparaissent des ondes stationnaires de longueur d'onde

$$\lambda_n = \frac{2s}{n}$$

n : nombre de noeuds de vibration

Au cours de l'expérience P1.6.3.1, on détermine, pour une fréquence d'excitation fixée, les longueurs d'onde λ_n des ondes stationnaires pour différentes longueurs de corde s et différentes masses de corde m . Cette longueur d'onde est ensuite appliquée à la force de tension F_n correspondante. L'exploitation permet de vérifier la relation

$$\lambda \propto \sqrt{\frac{F}{m^*}}$$

avec la masse linéique

$$m^* = \frac{m}{s}$$

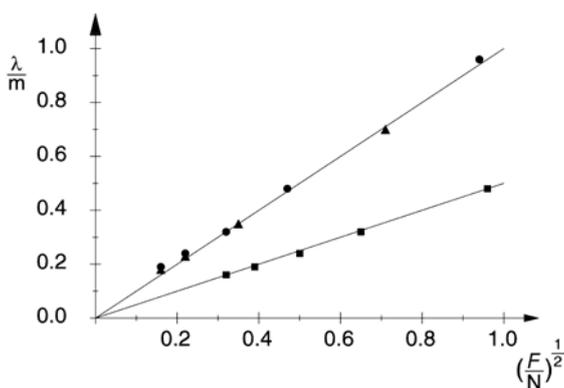
m : masse de la corde, s : longueur de la corde

Dans l'expérience P1.6.3.2, on utilise en plus un stroboscope pour le même programme de mesure. Il sert d'une part à déterminer la fréquence d'excitation f du moteur, d'autre part, à bien visualiser la polarisation circulaire de l'onde lorsque l'onde stationnaire le long de la corde est éclairée par les éclairs du stroboscope, dont la fréquence est proche de la fréquence d'excitation. La détermination supplémentaire de la fréquence f permet de calculer la vitesse de phase c des ondes le long de la corde selon

$$c = \lambda \cdot f$$

ainsi que de confirmer quantitativement la relation

$$c = \sqrt{\frac{F}{m^*}}$$



Détermination de la longueur d'onde λ des ondes stationnaires d'une corde en fonction de la force d'expansion F , de la longueur de corde s et de la masse spécifique m^* de la corde (P1.6.3.1)



PROPAGATION DES ONDES À LA SURFACE DE L'EAU

P1.6.4.1

Excitation d'ondes circulaires et rectilignes à la surface de l'eau

P1.6.4.2

Principe de Huygens appliqué aux ondes à la surface de l'eau

P1.6.4.3

Propagation des ondes dans l'eau à des profondeurs différentes

P1.6.4.4

Réfraction des ondes à la surface de l'eau

P1.6.4.5

Effet Doppler appliqué aux ondes à la surface de l'eau

P1.6.4.6

Réflexion sur une surface plane d'ondes à la surface de l'eau

P1.6.4.7

Réflexion sur des obstacles curvilignes d'ondes à la surface de l'eau

Excitation d'ondes circulaires et rectilignes à la surface de l'eau (P1.6.4.1)

N° de cat.	Désignation	P1.6.4.1	P1.6.4.2	P1.6.4.3	P1.6.4.4-7
401 501	Cuve à ondes D	1	1	1	1
LDS 00001	Chronomètre manuel, numérique	1			
311 78	Mètre ruban 2 m	1		1	

Il est particulièrement simple d'introduire les concepts fondamentaux de propagation d'ondes sur l'exemple des ondes à la surface de l'eau, puisque dans ce cas, la propagation s'observe à l'oeil nu.

Durant l'expérience P1.6.4.1, on étudie des ondes circulaires et rectilignes à la surface de l'eau. On calcule à chaque fois la longueur d'onde λ en fonction de la fréquence d'excitation f puis on en déduit la vitesse des ondes

$$v = f \cdot \lambda$$

Le but de l'expérience P1.6.4.2 consiste à vérifier le principe de Huygens. Pour cela, des ondes rectilignes rencontrent une arête, une fente étroite et une grille. On observe le changement de la direction de propagation, la formation d'ondes circulaires ainsi que la superposition d'ondes circulaires formant ainsi une onde rectiligne.

La propagation des ondes dans des profondeurs d'eau différentes fait l'objet des expériences P1.6.4.3 et P1.6.4.4. Une profondeur d'eau plus importante correspond à un milieu optiquement plus faible ayant un indice de réfraction n moins élevé. La loi de la réfraction

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

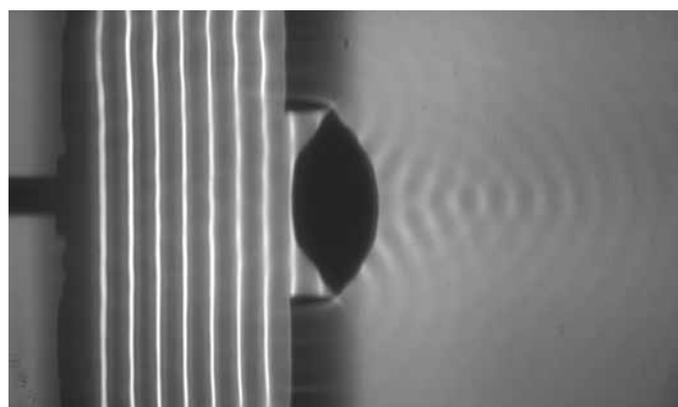
α_1, α_2 : angles par rapport à l'axe
d'incidence dans les milieux 1 resp. 2

λ_1, λ_2 : longueurs d'onde dans les milieux 1 resp. 2

s'applique lors du passage d'un milieu à un autre. Comme application pratique, on étudie un prisme, une lentille biconvexe ou une lentille biconcave pour ondes à la surface de l'eau.

Au cours de l'expérience P1.6.4.5, on observe l'effet Doppler sur des ondes circulaires pour différentes vitesses u de l'excitateur d'ondes.

On étudie la réflexion des ondes lors des expériences P1.6.4.6 et P1.6.4.7. En cas de réflexion d'ondes rectilignes et circulaires sur un obstacle droit, les faisceaux d'ondes obéissent à la loi de la réflexion. Lors de la réflexion d'ondes rectilignes sur un obstacle curviligne, les faisceaux d'ondes à l'origine parallèles se dispersent de façon divergente ou convergente selon la bombure de l'obstacle. On observe comme en optique une focalisation à un foyer ou une décomposition à partir d'un foyer virtuel.



Arrivée de rayons convergents derrière une lentille biconvexe (P1.6.4.4)

INTERFÉRENCE AVEC DES ONDES À LA SURFACE DE L'EAU

P1.6.5.1
Interférence à deux faisceaux d'ondes à la surface de l'eau

P1.6.5.2
Expérience de Lloyd avec des ondes à la surface de l'eau

P1.6.5.3
Diffraction par une fente et un obstacle d'ondes à la surface de l'eau

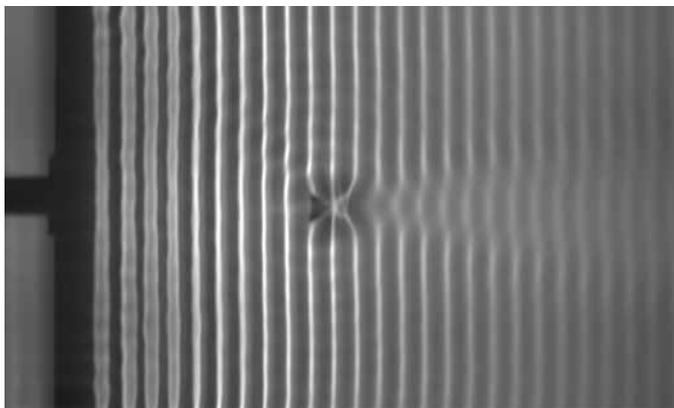
P1.6.5.4
Diffraction par des fentes multiples d'ondes à la surface de l'eau

P1.6.5.5
Ondes stationnaires à la surface de l'eau devant une paroi de réflexion



Interférence à deux faisceaux d'ondes à la surface de l'eau (P1.6.5.1)

N° de cat.	Désignation	P1.6.5.1-4	P1.6.5.5
401 501	Cuve à ondes D	1	1
311 78	Mètre ruban 2 m		1



Diffraction par un petit obstacle d'ondes à la surface de l'eau (P1.6.5.3)

Des expériences sur les interférences avec des ondes peuvent être facilement menées avec des ondes à la surface de l'eau puisque les objets de diffraction sont identifiables à l'oeil nu et que la propagation de l'onde diffractée peut elle aussi être suivie également à l'oeil nu.

Durant l'expérience P1.6.5.1, on compare l'interférence entre deux ondes circulaires cohérentes avec la diffraction d'ondes rectilignes par une fente double. Les deux dispositifs donnent les mêmes images d'interférences.

Au cours de l'expérience P1.6.5.2, on refait l'expérience de Lloyd sur la formation d'une interférence à deux faisceaux d'ondes à la surface de l'eau. Par réflexion sur un obstacle droit, une seconde source est créée, cohérente par rapport à la première. Il en résulte une figure d'interférence qui correspond à celle produite avec deux excitateurs simples cohérents.

Pendant l'expérience P1.6.5.3, un front d'ondes rectiligne rencontre une fente ou des obstacles de différentes largeurs. Une fente dont la largeur est inférieure à la longueur d'onde agit comme excitateur ponctuel d'ondes circulaires. Si la largeur de la fente est nettement supérieure à la longueur d'onde, alors les ondes rectilignes la traversent pratiquement sans être perturbées. Des ondes circulaires plus faibles se propagent uniquement dans l'espace situé directement derrière l'arête. Une largeur de fente proche de la longueur d'onde occasionne un modèle de diffraction prononcé avec un maximum principal large et des maxima secondaires latéraux. Si les ondes rencontrent un obstacle, alors les deux arêtes de l'obstacle agissent comme des centres d'excitation d'ondes circulaires. Le modèle de diffraction produit dépend fortement de la largeur de l'obstacle.

L'objet de l'expérience P1.6.5.4 est la diffraction par des fentes doubles, triples ou multiples d'ondes rectilignes à la surface de l'eau. L'écart entre les fentes est fixe. Il ressort que les maxima de diffraction sont de plus en plus prononcés au fur et à mesure que le nombre n de fentes augmente. En revanche, les angles pour lesquels on a les maxima de diffraction sont conservés.

L'expérience P1.6.5.5 montre la formation d'ondes stationnaires par réflexion d'ondes à la surface de l'eau sur une paroi parallèle à l'excitateur d'ondes. L'onde stationnaire montre pour des écarts constants des positions pour lesquelles les crêtes et les creux de l'onde émise et de l'onde réfléchie s'éliminent toujours réciproquement. Au milieu de deux noeuds de ce genre, l'oscillation est toujours maximale.

ONDES SONORES

P1.7.1.2
Battements acoustiques -
représentation avec l'oscilloscope

P1.7.1.3
Battements acoustiques -
tracé avec CASSY



Battements acoustiques - tracé avec CASSY (P1.7.1.3)

N° de cat.	Désignation	P1.7.1.2	P1.7.1.3
414 72	Diapasons de résonance, paire	1	1
586 26	Microphone universel	1	1
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1	
575 35	Adaptateur BNC/4 mm, bipolaire	1	
300 11	Socle	1	1
524 013	Sensor-CASSY 2		1
524 220	CASSY Lab 2		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		1

Acoustics is the study of sound and all its phenomena. This discipline deals with both the generation and the propagation of sound waves.

The experiment P1.7.1.2 demonstrates the wave nature of sound. Here, acoustic beats are investigated as the superposing of two sound waves generated using tuning forks with slightly different frequencies f_1 and f_2 . The beat signal is received via a microphone and displayed on the oscilloscope. By means of further (mis-) tuning of one tuning fork by moving a clamping screw, the beat frequency

$$f_s = f_2 - f_1$$

is increased, and the beat period (i. e. the interval between two nodes of the beat signal)

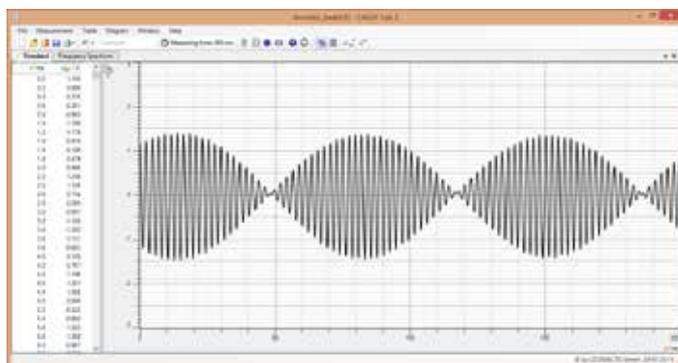
$$T_s = \frac{1}{f_s}$$

is reduced.

In the experiment P1.7.1.3, the acoustic beats are recorded and evaluated via the CASSY computer interface device. The individual frequencies f_1 and f_2 , the oscillation frequency f and the beat frequency f_s are determined automatically and compared with the calculated values

$$f = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

$$f_s = f_2 - f_1$$



Acoustic beats (P1.7.2.1)

OSCILLATIONS LE LONG D'UNE CORDE

P1.7.2.1

Détermination de la fréquence d'oscillation d'une corde en fonction de la longueur et de la tension de la corde



Détermination de la fréquence d'oscillation d'une corde en fonction de la longueur et de la tension de la corde (P1.7.2.1)

N° de cat.	Désignation	P1.7.2.1
414 01	Sonomètre (monocorde)	1
314 201	Dynamomètre de précision, 100 N	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 220	CASSY Lab 2	1
524 074	Timer S	1
337 46	Barrière lumineuse en U	1
501 16	Câble de connexion, à 6 pôles, 1,50 m	1
300 02	Pied en V, petit	1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

Dans la vibration fondamentale, la longueur s d'une corde oscillante correspond à une longueur d'onde deux fois moins grande. La fréquence de la vibration fondamentale vaut ainsi

$$f = \frac{c}{2s}$$

où la vitesse de phase c de la corde est donnée par

$$c = \sqrt{\frac{F}{A \cdot \rho}}$$

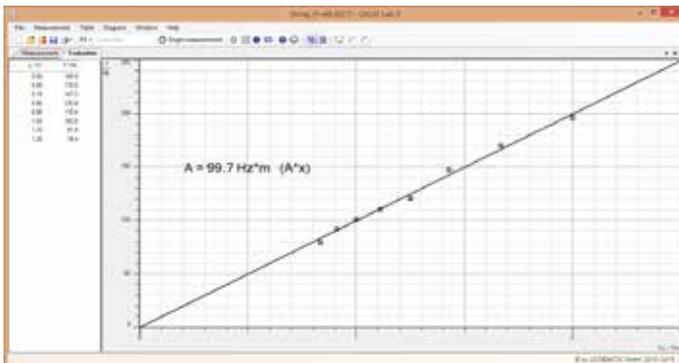
F : tension, A : section, ρ : densité de la corde

Au cours de l'expérience P1.7.2.1, on détermine la fréquence de vibration de la corde en fonction de sa longueur et de sa tension. Les mesures sont effectuées avec une barrière lumineuse et l'interface CASSY, utilisé ici comme chronomètre électronique extrêmement précis. Le but de l'exploitation est de vérifier les relations

$$f \propto \sqrt{F}$$

et

$$f \propto \frac{1}{s}$$



Fréquence f en fonction de la longueur de corde s (P1.7.2.1)



LONGUEUR D'ONDE ET VITESSE DU SON

P1.7.3.1
Tube de Kundt: Détermination de la longueur d'onde avec la méthode de la poussière de liège

P1.7.3.2
Détermination de la longueur d'onde d'ondes sonores stationnaires

Tube de Kundt: Détermination de la longueur d'onde avec la méthode de la poussière de liège (P1.7.3.1)

N° de cat.	Désignation	P1.7.3.1	P1.7.3.2
413 01	Tube de Kundt	1	
460 97	Règle métallique graduée, 0,5 m	1	
586 26	Microphone universel		1
587 08	Haut-parleur à large bande		1
522 621	Générateur de fonctions S 12		1
587 66	Plaque réfléchissante		1
300 11	Socle		3
311 78	Mètre ruban 2 m		1
531 120	Multimètre LDanalog 20		1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire		1

Des ondes stationnaires dont l'écart entre noeuds d'oscillation vaut

$$d = \frac{\lambda}{2}$$

peuvent également être produites par réflexion d'ondes sonores comme avec toutes les autres ondes. La longueur d'onde λ se mesure donc tout simplement sur des ondes sonores stationnaires.

Durant l'expérience P1.7.3.1, on étudie des ondes sonores stationnaires avec un tube de Kundt. De la poussière de liège s'élevant en tourbillons dans les ventres d'oscillation rend visibles les ondes sonores dans le tube. On détermine la longueur d'onde λ d'après l'écart entre les noeuds d'oscillation.

Au cours de l'expérience P1.7.3.2, des ondes stationnaires apparaissent par réflexion sur une paroi. Pour cela, des ondes sonores sont produites dans l'ensemble du domaine audible par un générateur de fonctions et un haut-parleur. On cherche les minima d'intensité avec un microphone puis on déduit la longueur d'onde d'après les écarts entre ces minima.



Détermination de la longueur d'onde d'ondes sonores stationnaires (P1.7.3.2)

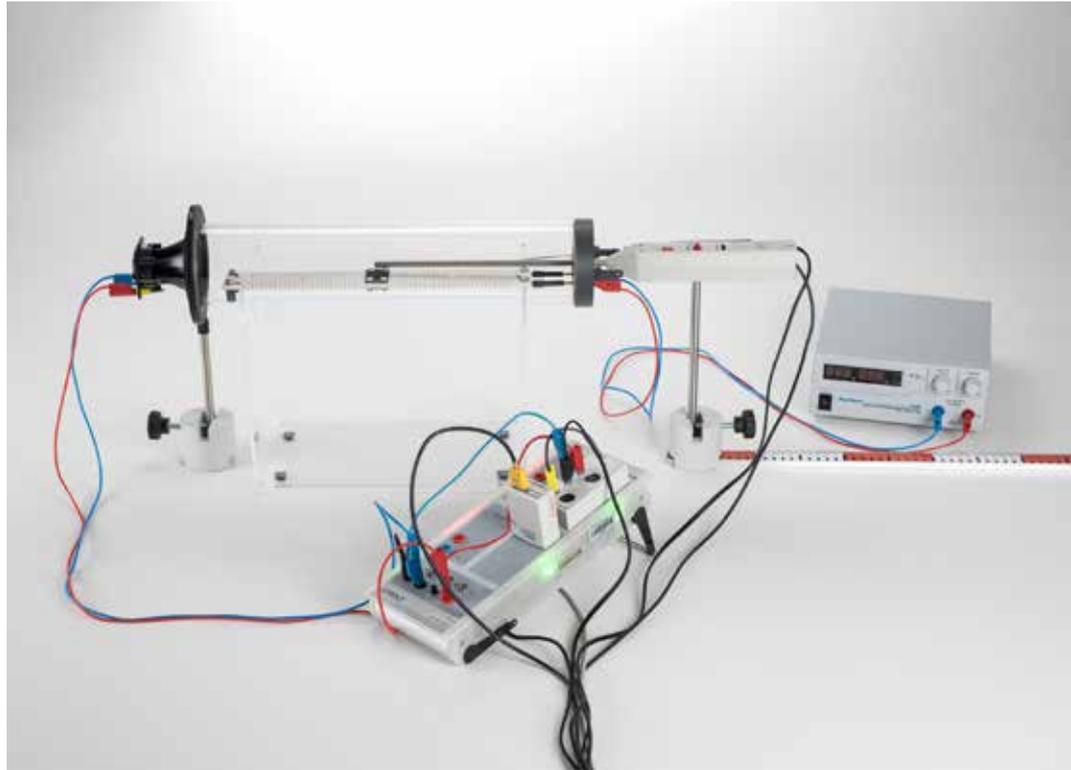
LONGUEUR D'ONDE ET VITESSE DU SON

P1.7.3.3

Détermination de la vitesse du son dans l'air en fonction de la température

P1.7.3.4

Détermination de la vitesse du son dans les gaz



Détermination de la vitesse du son dans l'air en fonction de la température (P1.7.3.3)

N° de cat.	Désignation	P1.7.3.3	P1.7.3.4
413 60	Appareil pour la vitesse du son	1	1
516 249	Support pour tubes et bobines	1	1
587 07	Haut-parleur d'aigus	1	1
586 26	Microphone universel	1	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1	1
524 220	CASSY Lab 2	1	1
524 034	Adaptateur timer	1	1
524 0673	Connecteur adaptateur NiCr-Ni S, type K	1	
529 676	Sonde de température NiCr-Ni, 1,5 mm, type K	1	
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A	1	
300 11	Socle	2	2
460 97	Règle métallique graduée, 0,5 m	1	1
501 44	Câble de connexion 19 A, 25 cm, rouge/bleu, paire	1	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	2	1
660 999	Bouteille de gaz comprimé Minican, dioxyde de carbone		1
660 984	Bouteille de gaz comprimé Minican, hélium		1
660 985	Bouteille de gaz comprimé Minican, néon		1
660 980	Soupape de réglage de précision pour bouteille de gaz comprimé Minican		1
667 194	Tuyau silicone 7 mm Ø, 1 m		1
604 481	Tuyau en caoutchouc 1 m x 4 mm Ø		1
604 510	Raccord de tuyaux, PP, droit, 4/15 mm Ø		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1

Les ondes sonores ne présentent qu'une faible dispersion, c'est-à-dire que lors de la propagation du son dans des gaz, les vitesses de groupe et de phase correspondent approximativement l'une à l'autre. La vitesse c du son peut ainsi être facilement déterminée en tant que vitesse de propagation d'une impulsion sonore. Dans les gaz considérés comme parfaits, on a :

$$c = \sqrt{\frac{p \cdot \kappa}{\rho}} \quad \text{avec} \quad \kappa = \frac{C_p}{C_v}$$

p : pression, ρ : densité, κ : coefficient adiabatique

C_p , C_v : capacités thermiques spécifiques

Dans l'expérience P1.7.3.3, on mesure la vitesse c du son dans l'air en fonction de la température ϑ puis on la compare avec la fonction linéaire

$$c(\vartheta) = c(0) + 0,6 \cdot \frac{\vartheta}{^\circ\text{C}} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

déoulant de la subordination à la température de la pression et de la densité. On détermine le coefficient adiabatique κ de l'air selon

$$\kappa = \frac{c(0)^2 \cdot \rho(0)}{p(0)}$$

à l'aide de la valeur $c(0)$ calculée par régression linéaire et des valeurs connues $p(0)$ et $\rho(0)$.

Au cours de l'expérience P1.7.3.4, on détermine la vitesse c du son dans le dioxyde de carbone et dans les gaz rares hélium et néon. L'exploitation montre que les grandes différences de vitesse montrées par le son sont principalement dues aux différences entre les densités des gaz. Comparé à cela, les différences dans les coefficients adiabatiques des gaz sont faibles.



LONGUEUR D'ONDE ET VITESSE DU SON

P1.7.3.5
Détermination de la vitesse du son dans les solides

Détermination de la vitesse du son dans les solides (P1.7.3.5)

N° de cat.	Désignation	P1.7.3.5
413 651	Tiges métalliques, 1,5 m, jeu de 3	1
300 46	Tige 150 cm, 12 mm Ø	1
587 251	Élément piézo-électrique	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 220	CASSY Lab 2	1
301 07	Pince de table simple	1
501 35	Câble d'expérimentation 32 A, 200 cm, rouge	1
501 36	Câble d'expérimentation 32 A, 200 cm, bleu	1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

Dans les corps solides, la vitesse du son est déterminée grâce au module d'élasticité E et à la densité ρ . La vitesse du son dans une longue baguette vaut

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

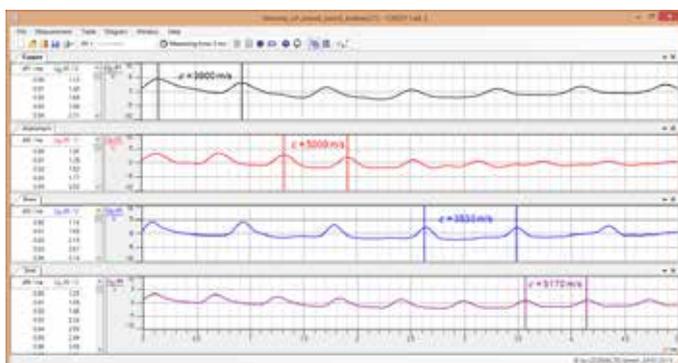
La mesure de la vitesse du son dans des matières solides constitue ainsi une méthode simple pour déterminer le module d'élasticité.

L'expérience P1.7.3.5 consiste à déterminer la vitesse du son dans des baguettes en aluminium, en cuivre, en laiton et en acier. Pour les mesures, on se sert de la réflexion multiple d'une courte impulsion sonore aux extrémités des baguettes. L'impulsion est produite par un coup de marteau sur l'extrémité supérieure puis elle se déplace tout d'abord vers le bas. Elle est réfléchiée plusieurs fois à chaque extrémité de sorte que les impulsions arrivant à une extrémité ont un retard Δt après avoir parcouru l'aller et retour. La vitesse du son vaut alors:

$$c = \frac{2s}{\Delta t}$$

s : longueur de la baguette

Pour tracer les impulsions, l'extrémité inférieure de la baguette repose sur un élément piézo-électrique qui convertit les oscillations de pression de l'impulsion sonore en oscillations électriques. Ces dernières sont tracées à l'aide du logiciel et de l'interface CASSY.

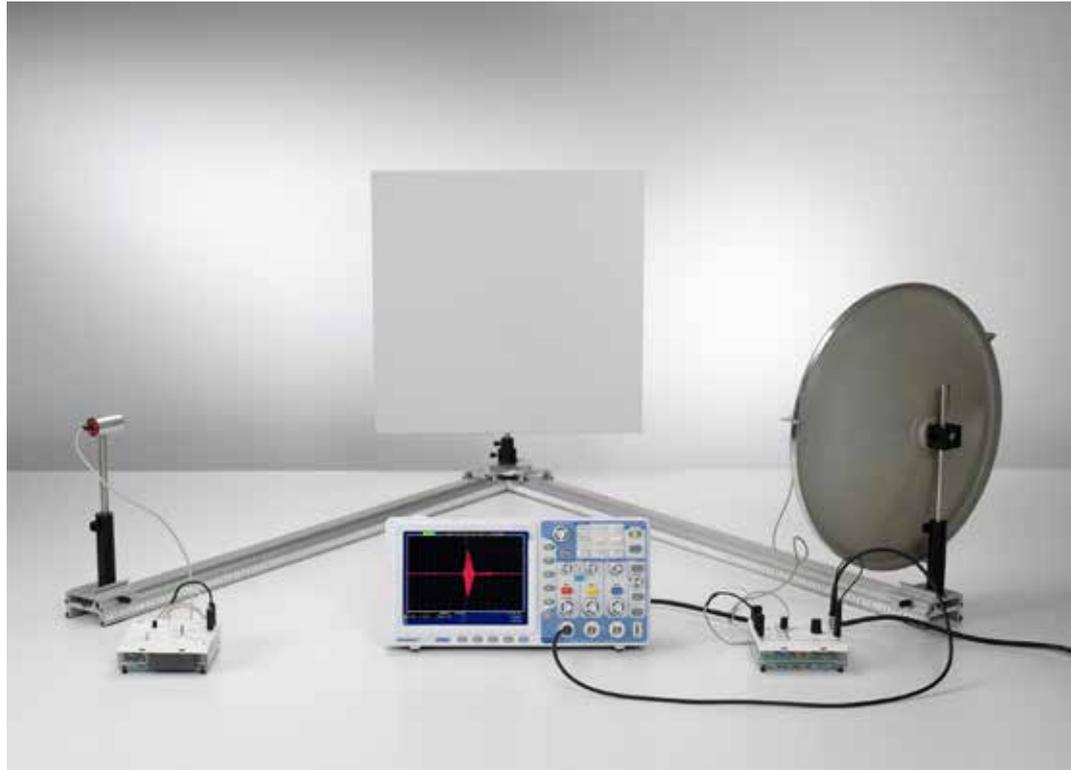


Velocity of sound in different materials (P1.7.3.5)

RÉFLEXION DES ONDES ULTRASONORES

P1.7.4.1
Réflexion des ondes ultrasonores planes sur une surface plane

P1.7.4.2
Principe de l'écho-sonde



Réflexion des ondes ultrasonores planes sur une surface plane (P1.7.4.1)

N° de cat.	Désignation	P1.7.4.1	P1.7.4.2
416 014	Générateur 40 kHz	1	1
416 015	Amplificateur CA	1	1
389 242	Miroir concave acoustique	1	
416 020	Support de détecteur pour miroir concave	1	
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1	1
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	1	2
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	2	
460 3151	Socle articulé avec échelle de lecture et noix	1	
460 3113	Cavalier avec noix 105/65	2	
587 66	Plaque réfléchissante	1	1
300 40	Tige 10 cm, 12 mm Ø	1	
301 27	Tige 50 cm, 10 mm Ø	1	
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	1	
666 615	Noix universelle	1	
361 051	Nivelle sphérique, 14 mm Ø	1	
311 78	Mètre ruban 2 m	1	
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø		1
300 11	Socle		3
311 02	Règle métallique, 1 m		1

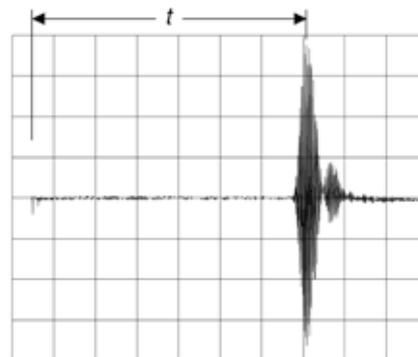
Les ondes ultrasonores sont produites à l'intérieur du transducteur par les oscillations mécaniques d'un élément piézo-électrique. Inversement, les ondes ultrasonores provoquent les oscillations mécaniques d'un élément piézo-électrique.

Le but de l'expérience est de vérifier la loi de la réflexion «angle d'incidence = angle de réflexion» pour les ondes ultrasonores. Pour cela, on place un transducteur d'ultrasons considéré comme source ponctuelle dans le foyer d'un miroir concave, de sorte qu'une onde ultrasonore plane soit produite. L'onde plane rencontre une surface plane avec un angle d'incidence α et y est réfléchi. L'intensité réfléchi est mesurée sous différents angles avec un second transducteur. La direction pour laquelle l'intensité est maximum est appelée angle de réflexion β .

On utilise au cours de l'expérience P1.7.4.2 le principe de l'écho-sonde pour déterminer la vitesse du son dans l'air et également pour déterminer des distances. On envoie depuis l'écho-sonde des signaux ultrasonores pulsés puis on mesure le temps mis par le signal réfléchi à la surface de séparation pour atteindre le récepteur. Pour des raisons de facilité, émetteur et récepteur se trouvent si possible au même endroit. On détermine d'après la différence de temps t entre le récepteur et l'émetteur et à l'aide de la relation

$$c = \frac{2s}{t}$$

d'une part la distance s au réflecteur en connaissant la vitesse du son ou d'autre part la vitesse du son en connaissant la distance.



Signal de l'écho-sonde (P1.7.4.2)

INTERFÉRENCES DES ONDES ULTRASONORES

P1.7.5.1
Battements des ondes ultrasonores

P1.7.5.2
Interférence à deux faisceaux d'ondes ultrasonores

P1.7.5.3
Diffraction d'ondes ultrasonores par une fente simple

P1.7.5.4
Diffraction d'ondes ultrasonores par une fente double, par des fentes multiples et par un réseau



Battements des ondes ultrasonores (P1.7.5.1)

N° de cat.	Désignation	P1.7.5.1	P1.7.5.2	P1.7.5.3	P1.7.5.4
416 015	Amplificateur CA	1	1	1	1
416 014	Générateur 40 kHz	2	1	1	1
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1			
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	1			
300 11	Socle	3	2		
311 902	Table tournante avec moteur d'entraînement		1	1	1
524 013	Sensor-CASSY 2		1	1	1
524 220	CASSY Lab 2		1	1	1
524 031	Adaptateur source de courant		1	1	1
521 546	Alimentation CC 0...16 V/0...5 A		1	1	1
501 031	Câble de raccordement, blindé, 8 m		1	1	1
311 78	Mètre ruban 2 m		1	1	
300 01	Pied en V, grand		1	1	1
300 02	Pied en V, petit		1	1	1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø		1	1	1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø		1	1	1
301 01	Noix Leybold		1	1	1
500 424	Câble de connexion 19 A, 50 cm, noir		1	1	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire		2	2	2
416 020	Support de détecteur pour miroir concave		1	1	1
416 021	Cadre avec support		1	1	1
416 030	Réseau et fentes pour expériences sur les ultrasons			1	1
389 242	Miroir concave acoustique			1	1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		1	1	1

L'utilisation d'ondes ultrasonores permettent une démonstration des expériences sur l'interférence facile à comprendre du fait que les objets de diffraction sont visibles à l'oeil nu. De plus, on peut produire des faisceaux d'ondes ultrasonores cohérents sans problèmes.

Au cours de l'expérience P1.7.5.1, on utilise deux transducteurs ayant des fréquences f_1 et f_2 légèrement différentes pour étudier les battements des ondes ultrasonores. Le signal résultant de la superposition des deux signaux simples est interprété comme une oscillation avec laquelle l'amplitude

$$A(t) \sim \cos(\pi \cdot (f_2 - f_1) \cdot t)$$

varie périodiquement. On détermine la fréquence de battement f_S d'après le temps écoulé entre deux noeuds de battement avant de la comparer avec la différence $f_2 - f_1$.

Durant l'expérience P1.7.5.2, on utilise deux transducteurs d'ultrasons identiques avec un générateur commun. Ils produisent deux faisceaux d'ondes ultrasonores cohérents qui interfèrent entre eux. La figure d'interférence correspond à la diffraction d'ondes planes par une fente double lorsque les deux transducteurs sont utilisés en phase. L'intensité calculée est ainsi maximale pour l'angle de diffraction α avec

$$\sin \alpha = n \cdot \frac{\lambda}{d}, \quad \text{avec } n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

λ : longueur d'onde,

d : Écart entre les deux Émetteurs d'ondes ultrasonores

Pour les expériences P1.7.5.3 et P1.7.5.4, on place un transducteur considéré comme source ponctuelle dans le foyer d'un miroir concave. Les ondes ultrasonores planes ainsi produites subissent une diffraction par une fente simple, une fente double puis par des fentes multiples. Pour le tracé assisté par ordinateur des figures de diffraction, l'émetteur d'ondes ultrasonores et les fentes sont montées ensemble sur la table tournante. On mesure la diffraction par une fente simple pour différentes largeurs b , la diffraction par une fente double pour différents écarts de fentes d et la diffraction par fentes multiples et par réseau pour différents nombre N de fentes.

EFFET DOPPLER ACOUSTIQUE

P1.7.6.1
Étude de l'effet Doppler avec des ondes ultrasonores

P1.7.6.2
Étude de l'effet Doppler avec des ondes ultrasonores - tracé et évaluation CASSY



Étude de l'effet Doppler avec des ondes ultrasonores (P1.7.6.1)

N° de cat.	Désignation	P1.7.6.1	P1.7.6.2
416 015	Amplificateur CA	1	1
416 014	Générateur 40 kHz	1	1
501 031	Câble de raccordement, blindé, 8 m	1	1
501 644	Douilles de raccordement, noires, jeu de 6	1	1
685 44	Pile 1,5 V (Mignon)	2	2
337 07	Chariot à entraînement électrique	1	1
460 81	Rail métallique de précision, 100 cm	2	2
460 85	Connecteur de rails	1	1
460 88	Pieds pour rails, paire	1	1
460 95	Cavalier	2	2
416 031	Effet Doppler acoustique, accessoires	1	1
575 471	Compteur S	1	
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1	
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	1	
313 27	Chronomètre manuel, 60s/0,2s	1	
300 02	Pied en V, petit	1	2
300 11	Socle	1	1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	1	1
300 43	Tige 75 cm, 12 mm Ø	1	1
301 01	Noix Leybold	1	2
608 100	Anneau support avec noix, 70 mm Ø	1	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1	1
524 013	Sensor-CASSY 2		1
524 220	CASSY Lab 2		1
524 034	Adaptateur timer		1
524 073	Capteur de déplacement à laser S		1
300 40	Tige 10 cm, 12 mm Ø		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		1

On appelle effet Doppler en acoustique la modification de la fréquence observée lors du mouvement relatif de l'émetteur ou du récepteur par rapport au milieu de propagation. Si l'émetteur de fréquence f_0 se déplace à la vitesse v par rapport au récepteur, alors le récepteur mesure la fréquence

$$f = \frac{f_0}{1 - \frac{v}{c}}$$

c : vitesse du son

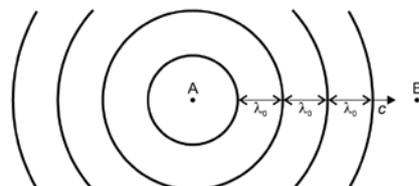
Si au contraire le récepteur se déplace à la vitesse v par rapport à l'émetteur immobile, on a :

$$f = f_0 \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

Le changement de fréquence $f - f_0$ est proportionnel à la fréquence f_0 . Il est donc facilement concevable d'étudier l'effet Doppler pour des ondes ultrasonores.

Durant l'expérience P1.7.6.1, deux transducteurs d'ultrasons servent soit d'émetteur soit de récepteur. Un transducteur est fixé sur un chariot à entraînement électrique alors que le second transducteur repose sur la table de laboratoire. La fréquence du signal reçu est mesurée avec un compteur numérique, extrêmement précis. Pour déterminer la vitesse du transducteur en mouvement, on chronomètre le temps Δt mis par le chariot pour parcourir une distance donnée.

Durant l'expérience P1.7.6.2, deux transducteurs d'ultrasons servent soit d'émetteur soit de récepteur. Un transducteur est fixé sur un chariot à entraînement électrique alors que le second transducteur repose sur la table de laboratoire. La fréquence du signal reçu est mesurée à l'aide d'un compteur numérique à haute résolution dans le dispositif CASSY. Le Sensor-CASSY 2 associé au capteur de déplacement à laser S mesure la vitesse du chariot en mouvement.



Propagation du son pour une source sonore fixe et un observateur (P1.7.6.1)

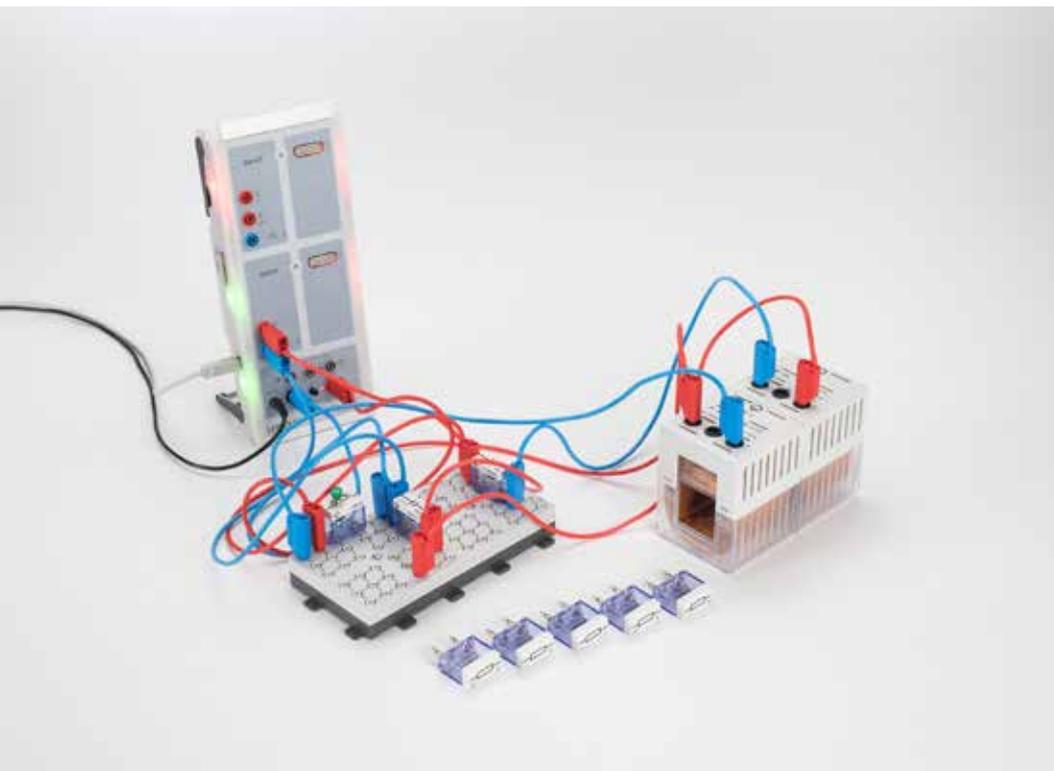
ANALYSE DE FOURIER

P1.7.7.1
Étude de la transformation de Fourier rapide: simulation de l'analyse et de la synthèse de Fourier

P1.7.7.2
Analyse de Fourier des signaux périodiques d'un générateur de fonctions

P1.7.7.3
Analyse de Fourier sur un circuit électrique oscillant

P1.7.7.4
Analyse de Fourier de sons



Analyse de Fourier sur un circuit électrique oscillant (P1.7.7.3)

N° de cat.	Désignation	P1.7.7.1	P1.7.7.2	P1.7.7.3	P1.7.7.4
524 220	CASSY Lab 2	1	1	1	1
522 621	Générateur de fonctions S 12		1		
524 013	Sensor-CASSY 2		1	1	1
501 45	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, rouge/bleu, paire		1		
562 14	Bobine à 500 spires			2	
578 15	Condensateur 1 µF, STE 2/19			2	
579 10	Bouton-poussoir (contacteur), STE 2/19			1	
577 19	Résistance 1 ohm, STE 2/19			1	
577 20	Résistance 10 ohms, STE 2/19			1	
577 21	Résistance 5,1 ohms, STE 2/19			1	
577 23	Résistance 20 ohms, STE 2/19			1	
577 32	Résistance 100 Ohms, STE 2/19			1	
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité , 20/10			1	
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge			4	
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu			4	
524 059	Microphone S				1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1	1	1

L'analyse et la synthèse de Fourier des ondes sonores constituent une aide précieuse en acoustique. La connaissance des harmoniques d'un son est par exemple importante pour la fabrication de sons ou de langages artificiels.

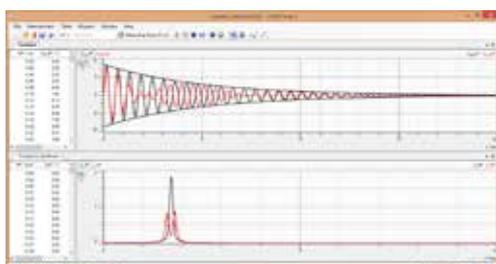
On étudie durant les expériences P1.7.7.1 et P1.7.7.2 les transformées de Fourier de signaux périodiques qui sont soit simulés numériquement, soit produits par un générateur de fonctions.

L'expérience P1.7.7.3 consiste à faire la comparaison entre le spectre fréquentiel de circuits électriques oscillants couplés et le spectre d'un circuit oscillant non couplé. La transformée de Fourier de l'oscillation non couplée amortie est une courbe de Lorentz

$$L(f) = L_0 \cdot \frac{\gamma^2}{(f - f_0)^2 + \gamma^2}$$

dont la largeur augmente avec la résistance ohmique du circuit oscillant. La transformée de Fourier du signal des circuits oscillants couplés montre un doublement en deux parties symétriques par rapport au signal non couplé dont l'écart dépend du couplage des circuits oscillants.

L'objet de l'expérience P1.7.7.4 est l'analyse de Fourier de sons de timbre acoustique différent et de hauteur différente. Les voyelles de la voix humaine et les sons d'instruments de musique sont analysés en exemple. Les différentes voyelles d'un langage se différencient avant tout dans les amplitudes des harmoniques. La fréquence fondamentale f_0 dépend de la hauteur de la voix. Elle vaut environ 200 Hz pour les voix aiguës et 80 Hz pour les voix graves. Le timbre est déterminé par l'excitation quelque peu différente des harmoniques. Le timbre d'instruments de musique est également lié à l'excitation des harmoniques.



Coupled oscillator circuit with its Fourier transform (P1.7.7.3)

ULTRASON DANS UN MILIEU

P1.7.8.1

Détermination de la vitesse de son dans des liquides - ondes ultrasoniques stationnaires comme un réseau optique

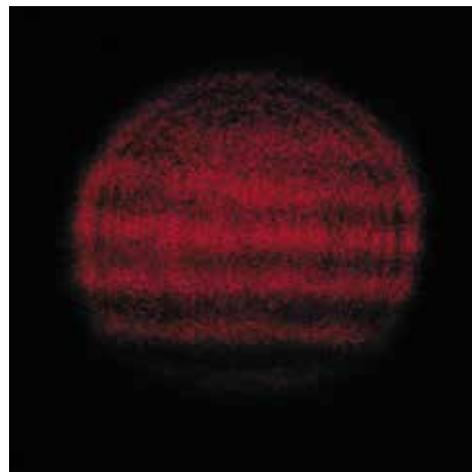


Détermination de la vitesse de son dans des liquides - ondes ultrasoniques stationnaires comme un réseau optique (P1.7.8.1)

N° de cat.	Désignation	P1.7.8.1
417 11	Générateur d'ultrasons 4 MHz	1
460 32	Banc d'optique à profil normalisé, 1 m	1
460 374	Cavalier 90/50 pour l'optique	5
471 791	Laser à diode, 635 nm, 1 mW	1
460 02	Lentille dans monture, f = +50 mm	1
460 25	Plateau pour prisme	1
477 02	Cuve en verre, 100 x 50 x 50 mm	1
460 380	Bras de rallonge	1
382 35	Thermomètre, -10...+50 °C/0,1 K	1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	1
301 01	Noix Leybold	1
441 531	Écran	1
675 3410	Eau, pure, 5 l	1
672 1210	Glycérol, 99 %, 250 ml	1
671 9740	Éthanol, solvant, 250 ml	1
673 5700	Chlorure de sodium 250 g	1

La technique des modulateurs acousto-optique utilisé dans la technique actuelle de télécommunication se base sur l'interaction entre le son et la lumière dans un milieu. Les fluctuations de densité produites dans l'eau par l'ultrason sont appelées réseau de diffraction.

Dans l'expérience P1.7.8.1, on étudie la longueur d'onde d'une onde ultrasonore stationnaire dans des liquides différents. De plus, la fluctuation de densité dans un liquide est représentée par projection géométrique sur un écran et mesurée. De plus, l'expérience représente l'effet classique de Debye-Sears, qui se définit comme étant la diffraction d'une onde optique d'une lumière de laser sur un réseau de diffraction (produit par ultrason) dans un liquide. Ceci est la base des modulateurs acousto-optiques.



Projection d'une onde stationnaire dans l'eau (P1.7.8.1)

POUSSÉE VERTICALE

P1.8.2.1

Vérification du principe d'Archimède

P1.8.2.2

Mesure de la force portante en fonction de la profondeur d'immersion



Vérification du principe d'Archimède (P1.8.2.1)

N° de cat.	Désignation	P1.8.2.1	P1.8.2.2
362 02	Cylindre d'Archimède	1	1
315 011	Balance hydrostatique	1	
315 31	Jeu de masses marquées, de 10 mg à 200 g	1	
664 111	Bécher DURAN, 100 ml, forme haute	1	
664 113	Bécher DURAN, 250 ml, forme haute	1	1
672 1210	Glycérol, 99 %, 250 ml	1	1
671 9720	Éthanol, solvant, 1 l	1	1
314 141	Dynamomètre de précision, 1,0 N		1
311 78	Mètre ruban 2 m		1

D'après le principe d'Archimède, tout corps plongé dans un liquide subit une poussée verticale F égale au poids G du liquide déplacé.

Le principe d'Archimède est vérifié expérimentalement au cours de l'expérience P1.8.2.1. Pour cela, un cylindre creux et un cylindre plein qui rentre exactement dans le cylindre creux, sont suspendus l'un au dessus de l'autre au fléau d'une balance. Le trait de la balance est mis sur le zéro. Si le cylindre plein est immergé dans un liquide, alors la balance indique la réduction de poids due à la poussée. Le trait de la balance revient sur zéro lorsque le cylindre creux est rempli avec le même liquide puisque le poids du liquide compense la poussée.

Durant l'expérience P1.8.2.2, un cylindre plein est immergé dans différents liquides, à une profondeur h . Le poids

$$G = \rho \cdot g \cdot A \cdot h$$

ρ : densité, g : accélération de la pesanteur,

A : section

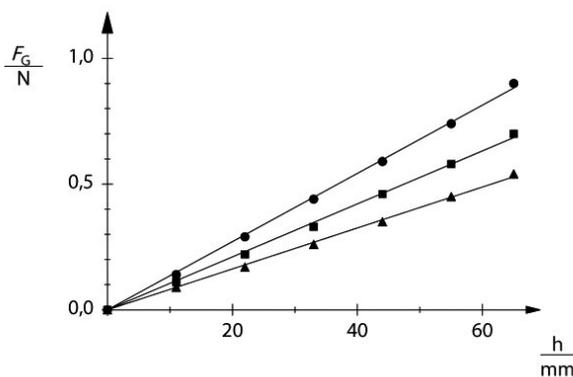
du liquide déplacé est mesuré avec un dynamomètre de précision comme poussée verticale F . L'expérience vérifie la relation

$$F \sim \rho$$

Tant que la profondeur d'immersion reste inférieure à la hauteur du cylindre, on a

$$F \sim h$$

Pour des profondeurs d'immersion supérieures, la poussée verticale reste constante.



Mesure de la poussée verticale en fonction de la profondeur d'immersion (P1.8.2.2)

VISCOSITÉ

P1.8.3.1

Construction d'un viscosimètre à chute de bille pour déterminer la viscosité de liquides visqueux



Construction d'un viscosimètre à chute de bille pour déterminer la viscosité de liquides visqueux (P1.8.3.1)

N° de cat.	Désignation	P1.8.3.1
379 001	Tube de Newton	1
336 21	Aimant de maintien	1
352 54	Bille d'acier 16 mm	1
336 25	Adaptateur pour aimant de maintien avec déclencheur	1
575 471	Compteur S	1
510 48	Aimants, 35 mm Ø, paire	1
300 01	Pied en V, grand	1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	1
300 44	Tige 100 cm, 12 mm Ø	1
301 01	Noix Leybold	1
301 11	Noix avec pince	1
311 78	Mètre ruban 2 m	1
672 1210	Glycérol, 99 %, 250 ml	6
590 08	Eprouvette graduée 100 ml	1*
311 54	Pied à coulisse de précision	1*
OHC R221	Balance Compact CR221, 220 g : 0,1 g	1*

* complément recommandé

On détermine la viscosité des liquides en mesurant le temps de chute d'une bille dans un viscosimètre à chute de bille. On remplit avec la substance étudiée le tube de chute d'un viscosimètre dans lequel la bille devra parcourir une distance étalonnée. La viscosité dynamique η du liquide s'obtient à partir du temps de chute t correspondant et d'après l'équation

$$\eta = K \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot t$$

ρ_2 : densité du liquide ÉtudiÉ

où la constante K et la densité ρ_1 de la bille sont relevées dans la documentation jointe au viscos. On détermine la viscosité des liquides en mesurant le temps de chute d'une bille dans un viscosimètre à chute de bille imètre.

L'objet de l'expérience P1.8.3.1 est la construction d'un viscosimètre à chute de bille puis l'étude de la méthode de mesure sur l'exemple de la viscosité de la glycérine.



VISCOSITÉ

P1.8.3.2

Viscosimètre à chute de bille de Höppler: mesure de la viscosité de solutions sucrées en fonction de la concentration

P1.8.3.3

Viscosimètre à chute de bille de Höppler: mesure de la viscosité de liquides newtoniens en fonction de la température

Viscosimètre à chute de bille de Höppler: mesure de la viscosité de solutions sucrées en fonction de la concentration (P1.8.3.2)

N° de cat.	Désignation	P1.8.3.2	P1.8.3.3
665 906	Viscosimètre à chute de bille d'Höppler	1	1
313 27	Chronomètre manuel, 60s/0,2s	1	1
666 7681	Circulateur chauffant SC 100-S5P		1
667 194	Tuyau silicone 7 mm Ø, 1 m		2
675 3410	Eau, pure, 5 l		2

Durant l'expérience P1.8.3.2, on étudie à température ambiante quelle est l'influence de la concentration d'une solution sur sa viscosité sur l'exemple de solutions de sucre concentrées.

Pour l'expérience P1.8.3.3, la chambre tempérée d'un viscosimètre est reliée à un thermostat à circulation, puis on mesure la viscosité d'un liquide newtonien (par exemple de l'huile d'olive) en fonction de la température.

VISCOSITÉ

P1.8.3.4 Loi de Hagen-Poiseuille



Loi de Hagen-Poiseuille (P1.8.3.4)

N° de cat.	Désignation	P1.8.3.4
665 195	Tube capillaire 300 x 5 mm, 0,4 mm Ø	1
665 196	Tube capillaire 300 x 8 mm, 2 mm Ø	1
665 205	Tube capillaire 300 mm x 8 mm, 0,8 mm Ø	1
667 510	Tube capillaire 400 mm x 8 mm, 1 mm Ø	1
460 21	Support pour éléments enfichables	1
590 02	Fiche à ressort, petite	2
LDS 00001	Chronomètre manuel, numérique	1
382 21	Thermomètre agitateur -10...+110 °C/1 K	1
311 02	Règle métallique, 1 m	1
362 05	Vase de décharge	1
665 752	Éprouvette graduée 25 ml, avec pied en plastique	1
608 160	Pince de Mohr, 50 mm	1
665 227	Raccord PP droit, 4/8 mm Ø, avec olive	1
667 194	Tuyau silicone 7 mm Ø, 1 m	1
667 197	Tuyau silicone, 4 mm Ø, 1 m	1
300 01	Pied en V, grand	1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	1
300 44	Tige 100 cm, 12 mm Ø	1
301 09	Noix double S	2
648 01	Boîte de rangement S8-FN	1
675 3400	Eau, pure, 1 l	1
460 135	Oculaire avec échelle graduée	1*
460 317	Banc d'optique, profil S1, 0,5 m	1*
460 312	Cavalier avec noix 45/35	2*

* complément recommandé

Pour un fluide newtonien (écoulement laminaire, par ex.), la loi de Hagen-Poiseuille décrit la relation entre le débit volumique J et la différence de pression Δp :

$$J = \frac{\pi \cdot \Delta p \cdot r^4}{8 \cdot \eta \cdot L}$$

η : Viscosité du fluide,

L : Longueur de la capillaire,

r : Rayon de la capillaire

Dans l'expérience P1.8.3.4, on vérifie la loi de Hagen-Poiseuille à l'aide de différents tubes capillaires afin d'obtenir différentes différences de pression.



TENSION SUPERFICIELLE

P1.8.4.1

Mesure de la tension superficielle selon la méthode d'arrachement

P1.8.4.2

Mesure de la tension superficielle selon la méthode d'arrachement – tracé et exploitation avec CASSY

Mesure de la tension superficielle selon la méthode d'arrachement (P1.8.4.1)

N° de cat.	Désignation	P1.8.4.1	P1.8.4.2
367 46	Dispositif de mesure de la tension superficielle	1	1
664 175	Cristallisoir Boro 3.3, 95 mm Ø, 55 mm, haut	1	1
314 111	Dynamomètre de précision, 0,1 N	1	
311 53	Pied à coulisse	1	1
300 76	Laborboy II (support élévateur)	1	1
300 02	Pied en V, petit	1	1
300 43	Tige 75 cm, 12 mm Ø	1	
301 08	Noix avec crochet	1	
671 9740	Éthanol, solvant, 250 ml	1	1
675 3400	Eau, pure, 1 l	1	1
524 060	Capteur de forces S, ±1 N		1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN		1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø		1
301 01	Noix Leybold		1

Pour déterminer la tension superficielle σ d'un liquide, on suspend un anneau métallique horizontalement à un dynamomètre de précision ou un capteur de force. L'anneau métallique est entièrement immergé dans le liquide de sorte que son arête supérieure soit également entièrement mouillée. Si l'on retire lentement l'anneau du liquide, une fine lamelle de liquide est tirée vers le haut. Cette lamelle s'arrache lorsque la force de traction dépasse la valeur limite

$$F = \sigma \cdot 4\pi \cdot R$$

R : rayon de l'anneau

Au cours des expériences P1.8.4.1 et P1.8.4.2, on détermine la tension superficielle de l'eau et de l'éthanol. Il s'avère alors que l'eau a une tension superficielle particulièrement élevée en comparaison avec d'autres liquides (valeur donnée pour l'eau $s = 0,073 \text{ Nm}^{-1}$, pour l'éthanol $s = 0,022 \text{ Nm}^{-1}$).

INITIATION À L'AÉRODYNAMIQUE

P1.8.5.1

Pression statique et détermination de l'écoulement volumétrique avec un tube de Venturi - mesure de la pression avec le manomètre de précision

P1.8.5.3

Détermination de la vitesse du vent avec une sonde de pression dynamique - mesure de la pression avec le manomètre de précision

P1.8.5.4

Pression statique et détermination de l'écoulement volumétrique avec un tube de Venturi - mesure de la pression avec le manomètre de précision

P1.8.5.6

Détermination de la vitesse du vent avec une sonde de pression dynamique - mesure de la pression avec un capteur de pression et le CASSY



Pression statique et détermination de l'écoulement volumétrique avec un tube de Venturi - mesure de la pression avec le manomètre de précision (P1.8.5.1)

N° de cat.	Désignation	P1.8.5.1	P1.8.5.3	P1.8.5.4	P1.8.5.6
373 041	Ventilateur aspirant/refoulant	1	1	1	1
373 091	Tube de Venturi avec multimanoscope	1		1	
373 10	Manomètre de précision	1	1		
300 02	Pied en V, petit	2	1	1	
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	1		1	
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø	1	1		
301 01	Noix Leybold	1		1	
391 151	Liquide manométrique 100 ml	1	1		
373 13	Sonde manométrique de Prandtl		1		1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN			1	1
524 066	Capteur de pression S, ± 70 hPa			1	1

La description d'un courant d'air dans un tube par les équations de continuité et de Bernoulli constitue la base de l'aérodynamique. Ces équations disent qu'indépendamment de la section A du tube, l'écoulement volumétrique

$$\dot{V} = v \cdot A$$

v : vitesse du courant

et la pression totale

$$p_0 = p + p_s \text{ avec } p_s = \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

p : pression statique, p_s : pression dynamique

ρ : densité de l'air

restent constants tant que la vitesse du courant est inférieure à la vitesse du son.

N.B.: Au cours des expériences P1.8.5.1 et P1.8.5.3, les mesures de pression sont effectuées avec un manomètre de précision. Il comprend outre une échelle de pression une échelle supplémentaire indiquant directement la vitesse du courant lors de mesures effectuées avec une sonde manométrique de Prandtl. Durant les expériences P1.8.5.4 et P1.8.5.6, la pression est mesurée avec un capteur de pression avec Mobile-CASSY.

Pour vérifier les deux équations, on mesure au cours d'expérience P1.8.5.1 et P1.8.5.4 la pression statique dans un tube Venturi à des sections différentes. La pression statique diminue au niveau de l'étranglement, puisque la vitesse du courant y augmente.

Dans l'expérience, on utilise un tube de Venturi pour mesurer l'écoulement volumétrique. On obtient d'après la différence de pression $\Delta p = p_2 - p_1$ entre deux positions de sections A_1 et A_2 connues.

Le but des expériences P1.8.5.3 et P1.8.5.6 est de déterminer les vitesses d'écoulement. Pour cela, la pression dynamique est mesurée avec une sonde manométrique de Prandtl comme différence entre la pression totale et la pression statique. On en déduit la vitesse pour une densité ρ connue.



MESURE DE LA RÉSISTANCE DE L'AIR

P1.8.6.1

Résistance de l'air en fonction de la vitesse du vent et de la forme de l'objet - mesure de la pression avec le manomètre de précision

P1.8.6.3

Répartition de la pression le long d'un profil d'aile - mesure de la pression avec le manomètre de précision

P1.8.6.4

Résistance de l'air en fonction de la vitesse du vent et de la forme de l'objet - mesure de la pression avec un capteur de pression et le CASSY

P1.8.6.6

Répartition de la pression le long d'un profil d'aile - mesure de la pression avec un capteur de pression et le CASSY

Résistance de l'air en fonction de la vitesse du vent et de la forme de l'objet - mesure de la pression avec le manomètre de précision (P1.8.6.1)

N° de cat.	Désignation	P1.8.6.1	P1.8.6.3	P1.8.6.4	P1.8.6.6
373 041	Ventilateur aspirant/refoulant	1	1	1	1
373 06	Veine d'essais pour l'aérodynamique	1	1	1	1
373 071	Accessoires de mesure 1	1		1	
373 075	Chariot de mesure pour le tunnel aérodynamique	1		1	
373 14	Dynamomètre sectoriel 0,65 N	1		1	
373 13	Sonde manométrique de Prandtl	1	1	1	1
373 10	Manomètre de précision	1	1		
300 02	Pied en V, petit	1	2	1	1
300 11	Socle	1		1	
300 43	Tige 75 cm, 12 mm Ø	1			
391 151	Liquide manométrique 100 ml	1	1		
373 70	Profil d'aile		1		1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø		1	1	
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN			1	1
524 066	Capteur de pression S, ± 70 hPa			1	1

Un courant d'air exerce sur un corps une force F_w parallèle à la direction du courant appelée traînée aérodynamique ou résistance de l'air. Cette force dépend de la vitesse de courant v , de l'air de la section transversale A du corps perpendiculaire à la direction du courant ainsi que de la forme du corps. On décrit l'influence de la forme du corps à l'aide du dit coefficient de traînée c_w par la formulation pour la résistance de l'air.

$$F_w = c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A$$

N.B.: Au cours des expériences P1.8.6.1 et P1.8.6.3, les mesures de pression sont effectuées avec un manomètre de précision. Il comprend outre une échelle de pression une échelle supplémentaire indiquant directement la vitesse du courant lors de mesures effectuées avec une sonde manométrique de Prandtl. Durant les expériences P1.8.6.4 et P1.8.6.6, la pression est mesurée avec un capteur de pression avec Mobile-CASSY.

Dans l'expérience P1.8.6.1 et P1.8.6.4, on étudie sur un disque l'influence de la vitesse du courant sur la traînée aérodynamique. La vitesse du courant est mesurée avec une sonde manométrique de Prandtl et la traînée aérodynamique avec un dynamomètre. Durant l'expérience, on détermine le coefficient de traînée de plusieurs corps ayant la même section.

L'objet des expériences P1.8.6.3 et P1.8.6.6 est la mesure de la pression statique p à plusieurs points de la face supérieure et de la face inférieure d'un profil d'aile. Suite aux mesures effectuées, on explique outre la traînée aérodynamique, l'apparition de la poussée verticale qui agit sur la surface portante.

MESURES DANS UN TUNNEL AÉRODYNAMIQUE

P1.8.7.1
Mesures sur des profils d'aile dans le tunnel aérodynamique

P1.8.7.3
Vérification de l'équation de Bernoulli
- Mesure avec le manomètre de précision

P1.8.7.4
Vérification de l'équation de Bernoulli
- Mesure avec un capteur de pression et le CASSY



Mesures sur des profils d'aile dans le tunnel aérodynamique (P1.8.7.1)

N° de cat.	Désignation	P1.8.7.1	P1.8.7.3	P1.8.7.4
373 12	Tunnel aérodynamique	1	1	1
373 041	Ventilateur aspirant/refoulant	1	1	1
373 075	Chariot de mesure pour le tunnel aérodynamique	1	1	1
373 08	Accessoires de mesure 2	1		
373 14	Dynamomètre sectoriel 0,65 N	1		
373 13	Sonde manométrique de Prandtl		1	1
373 10	Manomètre de précision		1	
391 151	Liquide manométrique 100 ml		1	
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN			1
524 066	Capteur de pression S, ± 70 hPa			1



Vérification de l'équation de Bernoulli - Mesure avec un capteur de pression et Mobile-CASSY (P1.8.7.4)

Le tunnel aérodynamique constitue une veine d'essai pour des études quantitatives en aérodynamique, dans laquelle une répartition de la vitesse du courant aérien constante en temps et en espace est garantie. Il convient entre autres pour la physique du vol.

Au cours de l'expérience P1.8.7.1, on mesure la traînée aérodynamique F_W et la poussée verticale F_A d'une surface portante en fonction de l'angle d'attaque α de l'aile par rapport à la direction du courant. On reporte dans un diagramme polaire F_W en fonction de F_A avec l'angle d'attaque α comme paramètre. On peut par exemple déduire de ce diagramme polaire l'angle d'attaque optimal. On effectue au cours de l'expérience des mesures correspondantes également sur des profils d'ailes fabriqués par l'expérimentateur. On étudie pour cela quelle forme le profil d'aile doit avoir pour obtenir un rapport F_W/F_A aussi petit que possible pour un angle d'attaque α donné.

Le but des deux expériences P1.8.7.3 et P1.8.7.4 est de vérifier l'équation de Bernoulli. On mesure la différence entre pression totale et pression statique en fonction de la section en ayant rajouté une rampe réduisant continuellement la section du tunnel aérodynamique le long de la direction du courant. En admettant que la loi de la continuité soit valable, la section A offre un moyen de mesurer la vitesse v du courant par

$$v = \frac{v_0 \cdot A_0}{A}$$

v_0 : vitesse du courant pour une section A_0

La relation

$$\Delta p \sim \frac{1}{A^2}$$

découlant de l'équation de Bernoulli est vérifiée.

P2 CHALEUR



P2.1	DILATATION THERMIQUE	59
P2.2	PROPAGATION DE LA CHALEUR	62
P2.3	LA CHALEUR COMME FORME D'ÉNERGIE	64
P2.4	TRANSITIONS DE PHASES	68
P2.5	THÉORIE CINÉTIQUE DES GAZ	71
P2.6	CYCLE THERMODYNAMIQUE	74

P2 CHALEUR



P2.1 DILATATION THERMIQUE

P2.1.1	Dilatation thermique des solides	59
P2.1.2	Dilatation thermique des liquides	60
P2.1.3	Anomalie thermique de l'eau	61

P2.2 PROPAGATION DE LA CHALEUR

P2.2.1	Conductivité thermique	62
P2.2.2	Capteur solaire	63

P2.3 LA CHALEUR COMME FORME D'ÉNERGIE

P2.3.1	Températures de mélange	64
P2.3.2	Capacités thermiques	65
P2.3.3	Transformation de l'énergie mécanique en chaleur	66
P2.3.4	Transformation de l'énergie électrique en chaleur	67

P2.4 TRANSITIONS DE PHASES

P2.4.1	Chaleur de fusion et d'évaporation	68
P2.4.2	Mesure de la pression de vapeur	69
P2.4.3	Température critique	70

P2.5 THÉORIE CINÉTIQUE DES GAZ

P2.5.2	Lois des gaz	71
P2.5.3	Chaleur spécifique des gaz	72
P2.5.4	Gaz réels	73

P2.6 CYCLE THERMODYNAMIQUE

P2.6.1	Moteur à air chaud: essais qualitatifs	74
P2.6.2	Moteur à air chaud: essais quantitatifs	75-76
P2.6.3	Pompe à chaleur	77



DILATATION THERMIQUE DES SOLIDES

P2.1.1.2
Dilatation thermique des solides -
mesure avec le pyromètre à cadran

P2.1.1.3
Mesure de la dilatation linéaire
des corps solides en fonction de la
température

P2.1.1.4
Dilatation thermique des solides -
tracé et évaluation CASSY

Dilatation thermique des solides - mesure avec le pyromètre à cadran (P2.1.1.2)

N° de cat.	Désignation	P2.1.1.2	P2.1.1.3	P2.1.1.4
381 341	Pyromètre à cadran D	1	1	
361 152	Compareur avec support	1	1	
382 34	Thermomètre, -10...+110 °C/0,2 K	1	1	1
303 28	Générateur de vapeur	1		
664 185	Boîte de Petri, 150 mm	1		
667 194	Tuyau silicone 7 mm Ø, 1 m	1	2	1
666 7681	Circulateur chauffant SC 100-S5P		1	
675 3410	Eau, pure, 5 l		2	
381 332	Tube en aluminium, 44 cm x 8 mm Ø			1
381 333	Tube en fer, 44 cm x 8 mm Ø			1
667 2545	Bouchon en caoutchouc, 1 trou de 6 mm, 17...23 mm Ø			1
664 248	Flûte Erlenmeyer Boro 3.3, 50 ml, col étroit			1
665 226	Raccord PP droit, 6/8 mm Ø, avec olive			1
686 53	Boîte ronde avec couvercle			1
524 013	Sensor-CASSY 2			1
524 220	CASSY Lab 2			1
524 082	Capteur de rotation S			1
311 78	Mètre ruban 2 m			1
301 21	Embase multifonctionnelle MF			2
301 27	Tige 50 cm, 10 mm Ø			2
301 09	Noix double S			2
666 615	Noix universelle			1
666 555	Pince de serrage universelle 0...80 mm			1
666 573	Anneau support avec tige 100 mm Ø			1
666 685	Toile calorifuge 160 mm x 160 mm			1
666 711	Bec autonome à butagaz			1
666 712ET3	Cartouche de gaz butane, 190 g, lot de 3			1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)			1

La longueur s d'un corps solide et la température ϑ sont liés linéairement en bonne approximation par la relations

$$s = s_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \vartheta)$$

s_0 : longueur ± 0 °C, ϑ : température en °C

Le coefficient de dilatation linéaire α d'un corps solide est fonction du matériau qui le constitue. Des mesures révélatrices de cet état de fait peuvent être réalisées sur de fins tubes à travers lesquels passe de l'eau chaude ou de la vapeur d'eau.

Durant l'expérience P2.1.1.2, on mesure à l'aide d'un pyromètre à cadran l'allongement de différents tubes au passage de la température ambiante à la température de la vapeur. La longueur effective s_0 des tubes peut être fixée à 200, 400 ou 600 mm.

Pour l'expérience P2.1.1.3, on utilise un thermostat à circulation pour chauffer l'eau qui traverse les différents tubes. Le changement de longueur des tubes est mesuré avec le pyromètre à cadran en fonction de la température ϑ .

Dans l'expérience P2.1.1.4 la vapeur d'eau est passée à travers différents tubes. La dilatation thermique qui se produit ainsi est mesurée par un capteur de rotation.

DILATATION THERMIQUE DES LIQUIDES

P2.1.2.1
Détermination du coefficient de dilatation cubique des liquides

P2.1.2.2
Détermination du coefficient de dilatation cubique des liquides -
Mesure avec Mobile-CASSY



Détermination du coefficient de dilatation cubique des liquides - Mesure avec Mobile-CASSY (P2.1.2.2)

N° de cat.	Désignation	P2.1.2.1	P2.1.2.2
382 15	Dilatomètre volumétrique	1	1
382 34	Thermomètre, -10...+110 °C/0,2 K	1	1
666 767	Plaque chauffante, 1500 W, 185 mm Ø	1	1
664 104	Bécher DURAN, 400 ml, forme basse	1	1
315 05	Balance d'enseignement et de laboratoire 311	1	1
300 02	Pied en V, petit	1	1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø	1	1
301 01	Noix Leybold	2	2
666 555	Pince de serrage universelle 0...80 mm	2	2
671 9720	Éthanol, solvant, 1 l	1	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN		1

En général, les liquides se dilatent plus que les solides sous l'effet de la chaleur. Le volume V d'un liquide et la température ϑ sont liés linéairement en bonne approximation par la relation:

$$V = V_0 \cdot (1 + \gamma \cdot \vartheta)$$

V_0 : volume à 0 °C, ϑ : température en °C

Pour déterminer le coefficient de dilatation γ , il faut tenir compte du fait que le récipient dans lequel le liquide est chauffé se dilate aussi.

Au cours de l'expérience P2.1.2.1 et P2.1.2.2, on détermine le coefficient de dilatation cubique de l'eau et de l'éthanol à l'aide d'un dilatomètre volumétrique en verre. Une colonne montante de section connue sert à mesurer le changement de volume, c.-à-d. que le changement de volume se détermine d'après la hauteur du liquide dans la colonne.

Dans l'expérience P2.1.2.2, la température est mesurée à l'aide d'un capteur de température et de Mobile-CASSY 2 WLAN.



Determination of volumetric expansion coefficient of liquids (P2.1.2.1)

ANOMALIE THERMIQUE
DE L'EAU

P2.1.3.1
Etude de la densité maximale de l'eau

P2.1.3.2
Etude de la densité maximale de l'eau -
Mesure avec Mobile-CASSY 2 WLAN



Etude de la densité maximale de l'eau - Mesure avec Mobile-CASSY (P2.1.3.2)

N° de cat.	Désignation	P2.1.3.1	P2.1.3.2
667 505	Appareil pour l'étude des anomalies de l'eau	1	1
382 35	Thermomètre, -10...+50 °C/0,1 K	1	
666 8451	Agitateur magnétique	1	1
602 725	Coupelle de laboratoire Boro 3.3, Ø 140 x 75 mm, 900 ml	1	1
665 009	Entonnoir PP 75 mm Ø	1	1
307 66	Tuyau souple en caoutchouc	1	1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø	1	1
666 555	Pince de serrage universelle 0...80 mm	1	1
301 01	Noix Leybold	1	1
300 02	Pied en V, petit	1	1
608 100	Anneau support avec noix, 70 mm Ø	1	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN		1

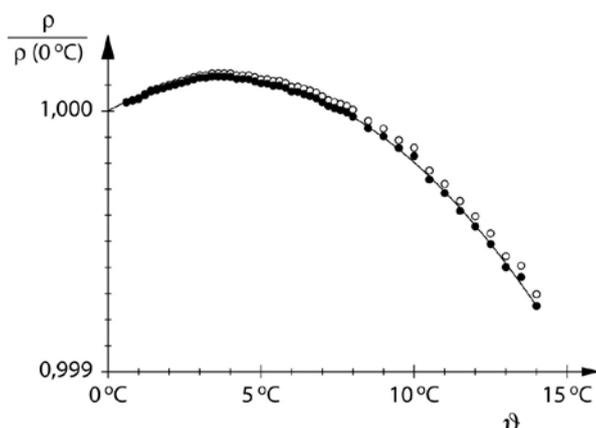
Un phénomène important du point de vue des conséquences est celui de l'anomalie de l'eau, lorsqu'on élève la température de cette dernière à partir de 0 °C: Jusqu'à une température de 4 °C, l'eau a un coefficient de dilatation négatif, c.-à-d. que le volume diminue lorsque la température s'élève. Après un passage par la valeur zéro à 4 °C, le coefficient de dilatation prend des valeurs positives. Comme la masse volumique correspond à l'inverse du volume d'une quantité de matière, l'eau a donc sa masse volumique maximale à 4 °C.

Au cours de l'expérience P2.1.3.1, on met en évidence la masse volumique maximale de l'eau en mesurant la dilatation dans un récipient avec capillaire. On refroidit tout le dispositif dans un bain d'eau glacée sous agitation permanente en partant de la température ambiante pour l'amener à environ 1 °C ou bien on le réchauffe lentement à température ambiante après un refroidissement dans un réfrigérateur. On mesure la hauteur d'ascension h en fonction de la température de l'eau ϑ . Comme le changement de volume comparé au volume global V_0 est très faible, la masse volumique est alors donnée par

$$\rho(\vartheta) = \rho(0\text{ °C}) \cdot \left(1 - \frac{A}{V_0} \cdot h(\vartheta)\right)$$

A: section du capillaire

L'expérience P2.1.3.2 vérifie également l'anomalie de l'eau. La température est mesurée à l'aide d'un capteur de température et du WLAN Mobile-CASSY 2.



Masse volumique relative de l'eau en fonction de la température (P2.1.3.1-2) la température

CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

P2.2.1.1

Détermination de la conductivité thermique de matériaux de construction selon le procédé à une plaque

P2.2.1.2

Détermination de la conductivité thermique de matériaux de construction selon le principe du capteur de flux thermique

P2.2.1.3

Atténuation de variations de température par des parois à couches multiples



Détermination de la conductivité thermique de matériaux de construction selon le procédé à une plaque (P2.2.1.1)

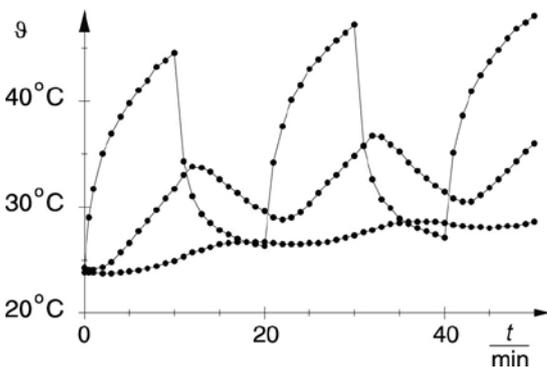
N° de cat.	Désignation	P2.2.1.1	P2.2.1.2	P2.2.1.3
389 29	Chambre calorimétrique	1	1	1
389 30	Échantillons de matériaux de construction pour la chambre calorimétrique	1	1	1
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A	1	1	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1	1	1
524 220	CASSY Lab 2	1	1	1
524 0673	Connecteur adaptateur NiCr-Ni S, type K	1	2	2
529 676	Sonde de température NiCr-Ni, 1,5 mm, type K	2	3	3
500 98	Douilles d'adaptation de sécurité, noires (6)	1	1	1
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir	2		2
500 644	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, noir	4	2	
450 641	Lampe halogène 12 V, 50/100W			1
450 63	Ampoule halogène 12 V/100 W, G6,35			1
300 11	Socle			1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1	1

Le flux de chaleur à travers une plaque de section A et d'épaisseur d dépend dans le cas stationnaire de la différence de température $\vartheta_2 - \vartheta_1$ entre la face avant et la face arrière ainsi que de la conductivité thermique λ du matériau de la plaque:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{d}$$

L'objectif des expériences P2.2.1.1 et P2.2.1.2 est de déterminer la conductivité thermique de matériaux de construction. On pose pour cela des plaques de matériaux de construction dans une chambre calorimétrique puis on les chauffe sur la face avant. On mesure les températures ϑ_1 et ϑ_2 avec des sondes. On détermine le flux de chaleur soit d'après la tension électrique de la plaque chauffante, soit par mesure de la température sur une plaque de mesure du flux de chaleur, compressée derrière la plaque de matériau de construction et dont la conductivité thermique λ_0 est connue.

Au cours de l'expérience P2.2.1.3, on étudie l'atténuation des variations de la température à travers des parois à deux couches. On simule le changement de température entre le jour et la nuit en allumant puis éteignant plusieurs fois une lampe qui éclaire la face extérieure de la paroi. Cela occasionne une „onde“ de température qui pénètre dans le mur et dont l'amplitude y est atténuée. On mesure les températures ϑ_A de la face extérieure, entre les deux couches ϑ_2 et ϑ_1 de la face intérieure en fonction du temps.



Variations de la température dans des parois à plusieurs couches (P2.2.1.3)

CAPTEUR SOLAIRE

P2.2.2.1

Rendement d'un capteur solaire



Rendement d'un capteur solaire (P2.2.2.1)

N° de cat.	Désignation	P2.2.2.1
389 50	Capteur solaire	1
579 220	Pompe à eau STE 2/50	1
521 491	Alimentation CA/CC 0...12 V/3 A	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1
524 0673	Connecteur adaptateur NiCr-Ni S, type K	1
529 676	Sonde de température NiCr-Ni, 1,5 mm, type K	2
311 78	Mètre ruban 2 m	1
300 02	Pied en V, petit	2
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø	1
300 43	Tige 75 cm, 12 mm Ø	1
301 01	Noix Leybold	2
666 555	Pince de serrage universelle 0...80 mm	1
590 06	Bécher gradué SAN, 1000 ml	1
604 431	Tuyau silicone, 5 mm Ø, 1 m	1
604 432	Tuyau en silicone, 6 mm Ø, 1 m	1
604 434	Tuyau en silicone, 8 mm Ø, 1 m	1
665 226	Raccord PP droit, 6/8 mm Ø, avec olive	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1

Un capteur solaire absorbe une énergie rayonnante et chauffe ainsi l'eau qui y circule. Si le capteur est plus chaud que l'environnement, il transmet de l'énergie à cet environnement par rayonnement, convection et conduction de chaleur. Son rendement

$$\eta = \frac{\Delta Q}{\Delta E}$$

c.-à-d. le rapport entre la quantité d'énergie cédée ΔQ et l'énergie rayonnante absorbée ΔE , baisse à cause de ces pertes.

Au cours de l'expérience P2.2.2.1, on détermine la quantité d'énergie ΔQ cédée par unité de temps d'après l'élévation de température de l'eau qui circule puis on estime l'énergie rayonnante absorbée par unité de temps d'après la puissance de la lampe et la distance qui la sépare de l'absorbeur. Pour cela, on fait varier le débit-volume de l'eau, soit l'isolation thermique du capteur solaire.

TEMPÉRATURES DE MÉLANGE

P2.3.1.1

Mesure de température d'un mélange d'eau

P2.3.1.2

Mesure de température d'un mélange d'eau - Mesure avec Mobile-CASSY



Mesure de température d'un mélange d'eau - Mesure avec Mobile-CASSY (P2.3.1.2)

N° de cat.	Désignation	P2.3.1.1	P2.3.1.2
384 161	Couvercle pour vase de Dewar de 250 ml	1	1
386 48	Vase de Dewar, 250 ml	1	1
382 34	Thermomètre, -10...+110 °C/0,2 K	1	
315 23	Balance d'enseignement et de laboratoire 610 Tara	1	1
313 27	Chronomètre manuel, 60s/0,2s	1	
666 767	Plaque chauffante, 1500 W, 185 mm Ø	1	1
664 104	Bécher DURAN, 400 ml, forme basse	2	2
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN		1

Si on mélange de l'eau froide de température ϑ_1 avec de l'eau chaude de température ϑ_2 , alors un échange de chaleur a lieu jusqu'à ce que toutes deux aient atteint la même température. Si aucune chaleur n'est cédée à l'environnement, alors la température du mélange vaut:

$$\vartheta_m = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \vartheta_1 + \frac{m_2}{m_1 + m_2} \vartheta_2$$

m_1, m_2 : masses de l'eau froide et l'eau chaude

La température du mélange ϑ_m correspond donc à une valeur moyenne pondérée des deux températures ϑ_1 et ϑ_2 .

Durant l'expérience P2.3.1.1, on évite que de la chaleur soit cédée à l'environnement en utilisant un vase de Dewar. Il possède deux parois séparées par du vide et sa face intérieure est métallisée. Pour garantir un échange de chaleur complet, l'eau est agitée soigneusement. On mesure la température du mélange pour différentes valeurs de $\vartheta_1, \vartheta_2, m_1$ et m_2 .

Dans l'expérience P2.3.1.2, les différentes températures sont mesurées avec un capteur de température et le Mobile-CASSY.

CAPACITÉS THERMIQUES

P2.3.2.1
Détermination de la chaleur spécifique de corps solides

P2.3.2.2
Détermination de la chaleur spécifique de corps solides -
Mesure avec Mobile-CASSY



Détermination de la chaleur spécifique de corps solides - Mesure avec Mobile-CASSY (P2.3.2.2)

N° de cat.	Désignation	P2.3.2.1	P2.3.2.2
384 161	Couvercle pour vase de Dewar de 250 ml	1	1
386 48	Vase de Dewar, 250 ml	1	1
382 34	Thermomètre, -10...+110 °C/0,2 K	1	
384 34	Étuve	1	1
384 35	Grenaille de cuivre, 200 g	1	1
384 36	Billes de verre, 100 g	1	1
315 76	Grenaille de plomb, 200 g	1	1
315 23	Balance d'enseignement et de laboratoire 610 Tara	1	1
303 28	Générateur de vapeur	1	1
664 104	Bécher DURAN, 400 ml, forme basse	1	1
667 194	Tuyau silicone 7 mm Ø, 1 m	1	1
300 02	Pied en V, petit	1	1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø	1	1
301 01	Noix Leybold	1	1
666 555	Pince de serrage universelle 0...80 mm	1	1
667 614	Gants anti-chaleur	1	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN		1

La quantité de chaleur ΔQ mise en jeu lors du chauffage ou du refroidissement d'un corps est proportionnelle au changement de température $\Delta\vartheta$ et à la masse m du corps:

$$\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta\vartheta$$

Le coefficient de proportionnalité c , la capacité thermique spécifique du corps, est une grandeur qui dépend du matériau.

Pour déterminer la capacité thermique spécifique, on pèse au cours de l'expérience P2.3.2.1 différentes matières sous forme de grenaille, on les chauffe à la température ϑ_1 avec de la vapeur d'eau puis on les jette dans une quantité d'eau pesée de température ϑ_2 . Après une agitation minutieuse, la grenaille et l'eau atteignent la même température ϑ_m par échange de chaleur. La chaleur cédée par la grenaille

$$\Delta Q_1 = c_1 \cdot m_1 \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_m)$$

m_1 : masse de la grenaille

c_1 : chaleur massique de la grenaille

est donc égale à la chaleur absorbée par l'eau

$$\Delta Q_2 = c_2 \cdot m_2 \cdot (\vartheta_m - \vartheta_2)$$

m_2 : masse de l'eau

La capacité thermique spécifique c_2 de l'eau est supposée connue. La température ϑ_1 correspond à la température de la vapeur d'eau. A partir de là, on peut donc calculer la grandeur recherchée c_1 d'après les grandeurs mesurées ϑ_2 , ϑ_m , m_1 et m_2 .

Dans l'expérience P2.3.2.2, les différentes températures sont mesurées avec un capteur de température et le Mobile-CASSY.

TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE MÉCANIQUE EN CHALEUR

P2.3.3.1

Transformation de l'énergie mécanique en énergie thermique - tracé et évaluation manuels des valeurs mesurées

P2.3.3.2

Transformation de l'énergie mécanique en énergie thermique - Mesure avec CASSY



Transformation de l'énergie mécanique en énergie thermique - tracé et évaluation manuels des valeurs mesurées (P2.3.3.1)

N° de cat.	Désignation	P2.3.3.1	P2.3.3.2
388 00	Appareil de base pour déterminer l'équivalent mécanique de la chaleur	1	1
388 01	Calorimètre à eau	1	1
388 02	Calorimètre en cuivre	1	1
388 03	Calorimètre en aluminium	1	1
388 04	Calorimètre en aluminium, grand	1	1
388 051	Thermomètre pour calorimètre, +15...35 °C/0,2 K	1	
388 24	Masse marquée, 5 kg	1	1
524 013	Sensor-CASSY 2		1
524 220	CASSY Lab 2		1
524 074	Timer S		1
524 0673	Connecteur adaptateur NiCr-Ni S, type K		1
529 676	Sonde de température NiCr-Ni, 1,5 mm, type K		1
337 46	Barrière lumineuse en U		1
501 16	Câble de connexion, à 6 pôles, 1,50 m		1
300 02	Pied en V, petit		1
301 11	Noix avec pince		1
300 40	Tige 10 cm, 12 mm Ø		1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø		1
301 07	Pince de table simple		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		1

L'énergie compte parmi les grandeurs fondamentales de la physique générale. Cela a deux raisons: d'une part, les différentes formes d'énergie sont transformables l'une en l'autre et ainsi équivalentes entre elles et d'autre part, lors d'une transformation, toute l'énergie d'un système clos est conservée.

Dans l'expérience P2.3.3.1 et P2.3.3.2, on met en évidence l'équivalence entre énergie mécanique et énergie thermique: à l'aide d'une manivelle, on fait tourner différents récipients calorimétriques sur leurs axes, les faisant ainsi chauffer par frottement contre une corde en nylon. La force de frottement correspond au poids G d'une masse marquée suspendue. Pour n tours du calorimètre, le travail mécanique

$$W_n = G \cdot n \cdot \pi \cdot d$$

d : diamètre du calorimètre

est effectué. Il entraîne une élévation de température du calorimètre correspondant à la quantité de chaleur

$$Q_n = m \cdot c \cdot (\vartheta_n - \vartheta_0)$$

c : capacité thermique spécifique, m : masse,

ϑ_n : température après n tours

Pour vérifier la relation

$$Q_n = W_n$$

les deux grandeurs sont reportées dans un diagramme à des fins de comparaison. Le tracé et l'exploitation sont effectués manuellement.

Dans l'expérience P2.3.3.1, la mesure est effectuée et évaluée manuellement point par point. L'expérience P2.3.3.2 tire parti du système de mesure assisté par ordinateur CASSY.



TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE EN CHALEUR

- P2.3.4.1 Transformation de l'énergie électrique en énergie thermique - mesure avec voltmètre et ampèremètre
- P2.3.4.2 Transformation de l'énergie électrique en énergie thermique - mesure avec joulemètre et wattmètre
- P2.3.4.3 Transformation de l'énergie électrique en énergie thermique - mesure avec CASSY
- P2.3.4.4 Transformation de l'énergie électrique en énergie thermique - mesure avec Mobile-CASSY

Transformation de l'énergie électrique en énergie thermique - mesure avec Mobile-CASSY (P2.3.4.4)

N° de cat.	Désignation	P2.3.4.1	P2.3.4.2	P2.3.4.3	P2.3.4.4
384 20	Couvercle pour vase de Dewar de 250 ml, avec chauffage	1			
386 48	Vase de Dewar, 250 ml	1			
382 34	Thermomètre, -10...+110 °C/0,2 K	1			
313 27	Chronomètre manuel, 60s/0,2s	1			
664 103	Bécher DURAN, 250 ml, forme basse	1			
665 755	Éprouvette graduée 250 ml, avec pied en plastique	1			
521 546	Alimentation CC 0...16 V/0...5 A	1			
501 28	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, noir	1			
501 45	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, rouge/bleu, paire	1	1	1	1
388 02	Calorimètre en cuivre		1	1	1
388 03	Calorimètre en aluminium		1	1	1
388 04	Calorimètre en aluminium, grand		1	1	1
388 051	Thermomètre pour calorimètre, +15...35 °C/0,2 K		1		
388 06	Câbles de connexion, paire		1	1	1
531 831	Joulemètre-wattmètre		1		
521 491	Alimentation CA/CC 0...12 V/3 A		1	1	1
524 013	Sensor-CASSY 2			1	
524 220	CASSY Lab 2			1	
524 0673	Connecteur adaptateur NiCr-Ni S, type K			1	
529 676	Sonde de température NiCr-Ni, 1,5 mm, type K			1	
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN				1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)			1	

Tout comme l'énergie mécanique, l'énergie électrique peut être transformée en chaleur. On utilise par exemple un récipient calorimétrique avec un enroulement en fils auquel on applique une tension. Lorsque le courant circule dans le fil, la chaleur Joule produite chauffe le calorimètre.

Au cours de la expérience P2.3.4.1, l'énergie électrique fournie

$$W(t) = U \cdot I \cdot t$$

est déterminée en mesurant la tension U , le courant I et le temps t . Elle provoque dans le calorimètre un changement de température correspondant à la quantité de chaleur

$$Q(t) = m \cdot c \cdot (\vartheta(t) - \vartheta(0))$$

c : capacité thermique spécifique

m : masse

$\vartheta(t)$: température au moment t

Pour vérifier l'équivalence

$$Q(t) = W(t)$$

on reporte les deux grandeurs l'une en fonction de l'autre dans un diagramme.

Au cours de la expérience P2.3.4.2, l'énergie électrique fournie est mesurée directement avec le Joulemètre et wattmètre. Elle provoque dans le calorimètre un changement de température correspondant à la quantité de chaleur.

Au cours de la expérience P2.3.4.3, il s'agit de procéder à la mise en évidence expérimentale de l'équivalence entre l'énergie électrique E_{el} et l'énergie thermique E_{th} . Pour ce faire, l'énergie électrique E_{el} fournie dans l'expérience dans le filament chauffant (ou spirale chauffante) est convertie en chaleur E_{th} . Ceci entraîne une élévation de la température du calorimètre (ou de l'eau dans laquelle est plongée la spirale chauffante). Il est possible de saisir quantitativement les deux formes d'énergie exprimées en watts par seconde (Ws) et joules (J) pour une tension constante U en mesurant simultanément le courant I et la température ϑ en fonction du temps t ; l'expérience a ainsi prouvé leur équivalence: $E_{el} = E_{th}$.

The supplied electrical energy is determined in the experiment P2.3.4.4 by measuring with the Mobile-CASSY.

CHALEUR DE FUSION ET D'ÉVAPORATION

P2.4.1.1

Détermination de la chaleur d'évaporation de l'eau

P2.4.1.2

Détermination de la chaleur de fusion de la glace

P2.4.1.3

Détermination de la chaleur d'évaporation de l'eau - Mesure avec Mobile-CASSY

P2.4.1.4

Détermination de la chaleur de fusion de la glace - Mesure avec Mobile-CASSY



Détermination de la chaleur d'évaporation de l'eau - Mesure avec Mobile-CASSY (P2.4.1.3)

N° de cat.	Désignation	P2.4.1.1	P2.4.1.2	P2.4.1.3	P2.4.1.4
386 48	Vase de Dewar, 250 ml	1	1	1	1
384 17	Piège à eau	1		1	
382 34	Thermomètre, -10...+110 °C/0,2 K	1	1		
315 23	Balance d'enseignement et de laboratoire 610 Tara	1	1	1	1
303 28	Générateur de vapeur	1		1	
667 194	Tuyau silicone 7 mm Ø, 1 m	1		1	
664 104	Bécher DURAN, 400 ml, forme basse	1	1	1	1
300 02	Pied en V, petit	1		1	
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø	1		1	
301 01	Noix Leybold	2		2	
666 555	Pince de serrage universelle 0...80 mm	2		2	
303 25	Thermoplongeur		1		1
590 06	Bécher gradué SAN, 1000 ml		1		1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN			1	1

En général, si on chauffe une substance à pression constante, sa température augmente. Si toutefois une transition de phase a lieu dans la substance, la température n'augmente pas malgré l'apport de chaleur puisque la chaleur est utilisée pour passer d'une phase à l'autre. Dès que le passage d'une phase à une autre est achevé, la température augmente à nouveau avec un apport de chaleur supplémentaire. La chaleur massique d'évaporation Q_V par unité de volume est par exemple nécessaire pour l'évaporation de l'eau. Quant à la fusion de la glace, elle nécessite la chaleur massique de fusion Q_S par unité de volume.

Durant l'expérience P2.4.1.1, pour déterminer la chaleur massique Q_V d'évaporation de l'eau, on fait passer de la vapeur d'eau pure dans un calorimètre, faisant ainsi chauffer de l'eau froide à la température de mélange ϑ_m . La vapeur d'eau se condense en eau du fait de la chaleur d'évaporation cédée. Cette eau est refroidie à la température du mélange. On mesure la température initiale ϑ_2 , la masse m_2 de l'eau froide, la température du mélange ainsi que la masse totale

$$m = m_1 + m_2$$

D'après la comparaison entre quantités de chaleur cédée et absorbée, on a :

$$Q_V = \frac{m_1 \cdot c \cdot (\vartheta_m - \vartheta_1) + m_2 \cdot c \cdot (\vartheta_m - \vartheta_2)}{m_1}$$

$$\vartheta_1 \approx 100 \text{ °C}, c : \text{chaleur massique de l'eau}$$

Au cours de l'expérience P2.4.1.2 et P2.4.1.4, on remplit un calorimètre de glace afin de déterminer la chaleur massique de fusion, refroidissant ainsi de l'eau chaude à la température de mélange ϑ_m . La glace fond en eau par absorption de la chaleur de fusion. Cette eau atteint la température du mélange. Comme pour la expérience P2.4.1.1, on a pour la chaleur massique de fusion

$$Q_S = \frac{m_1 \cdot c \cdot (\vartheta_m - \vartheta_1) + m_2 \cdot c \cdot (\vartheta_m - \vartheta_2)}{m_1}$$

$$\vartheta_1 = 0 \text{ °C}$$

In experiments P2.4.1.1 and P2.4.1.2, the temperature is measured with a thermometer. In experiments P2.4.1.3 and P2.4.1.4, the temperature is measured with the Mobile-CASSY and the corresponding temperature sensor.



MESURE DE LA PRESSION DE VAPEUR

P2.4.2.1
Relevé de la courbe de la pression de vapeur de l'eau - pressions jusqu'à 1 bar

P2.4.2.2
Relevé de la courbe de la pression de vapeur de l'eau - pressions jusqu'à 50 bars

Relevé de la courbe de la pression de vapeur de l'eau - pressions jusqu'à 50 bars (P2.4.2.2)

N° de cat.	Désignation	P2.4.2.1	P2.4.2.2
664 315	Ballon à fond rond, à 2 cols, 250 ml	1	
665 305	Raccord, rodage mâle : RN 19/26, GL 18	1	
667 186	Tuyau pour vide, 8 mm Ø	1	
665 255	Robinet à 3 voies en T, robinet RN	1	
378 031	Embout DN 16 KF	1	
378 045	Anneau de centrage DN 16 KF	1	
378 050	Anneau de serrage DN 10/16 KF	1	
378 701	Graisse Leybold pour vide poussé	1	
524 013	Sensor-CASSY 2	1	
524 220	CASSY Lab 2	1	
524 065	Capteur de pression absolue S, 0...1500 hPa	1	
501 11	Câble rallonge, à 15 pôles	1	
688 808	Tige, 10 x 223 mm, avec filetage M6	1	
524 045	Adaptateur de température NiCr-Ni/CTN	1	
666 216	Thermocouple NiCr-Ni à réponse rapide	1	
300 02	Pied en V, petit	1	
300 43	Tige 75 cm, 12 mm Ø	1	
666 555	Pince de serrage universelle 0...80 mm	1	
301 01	Noix Leybold	3	
666 573	Anneau support avec tige 100 mm Ø	1	
666 685	Toile calorifuge 160 mm x 160 mm	1	
666 711	Bec autonome à butagaz	1	1
666 712ET3	Cartouche de gaz butane, 190 g, lot de 3	1	1
667 614	Gants anti-chaleur	1	1
385 16	Appareil à vapeur sous haute pression	1	
664 109	Bécher DURAN, 25 ml, forme basse	1	
300 01	Pied en V, grand	1	
667 6131	Surlunettes	1	
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	

La pression de vapeur p d'un mélange liquide / vapeur dans un système clos dépend de la température T . Au-delà de la température critique, la pression de vapeur n'est plus définie. La substance est gazeuse et elle ne peut plus être liquéfiée avec une pression aussi élevée. La pente de la courbe de la pression de vapeur $p(T)$ se détermine entre autres grâce à la chaleur massique molaire d'évaporation q_v de la substance:

$$T \cdot \frac{dp}{dT} = \frac{q_v}{v_1 - v_2} \quad (\text{Clausius-Clapeyron})$$

T : température absolue

v_1 : volume molaire de la vapeur

v_2 : volume molaire du liquide

Comme en général v_2 est négligeable et que q_v varie à peine au cours du temps, on a une bonne approximation de la loi des gaz parfaits

$$\ln p = \ln p_0 - \frac{q_v}{R \cdot T}$$

Durant l'expérience P2.4.2.1, on trace la courbe de la pression de vapeur de l'eau en dessous du point d'ébullition normal à l'aide de l'interface CASSY. L'eau se trouve dans une ampoule en verre qui a été scellée pendant que l'eau bouillait à pression normale. La mesure de la pression de vapeur p en fonction de la température T a lieu lors du refroidissement ou du chauffage consécutif du système.

Dans l'expérience P2.4.2.2, on utilise l'appareil à vapeur sous haute pression pour des mesures de pressions jusqu'à 50 bars. La pression peut être directement relevée sur le manomètre. Un thermomètre indique la température correspondante. Les valeurs mesurées sont tracées puis exploitées manuellement point par point.



Enregistrement de la courbe vapeur-pression de l'eau - Pressions jusqu'à 1 bar (P2.4.2.1)

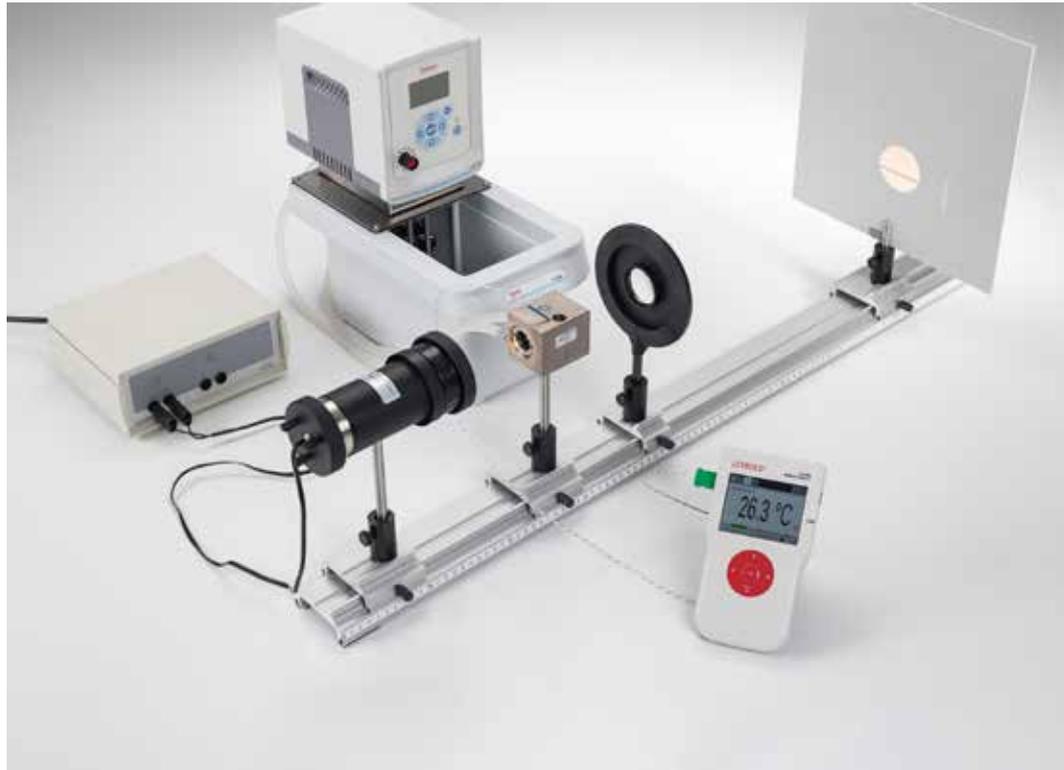
TEMPÉRATURE CRITIQUE

P2.4.3.1

Etude d'un mélange liquide / gaz au point critique

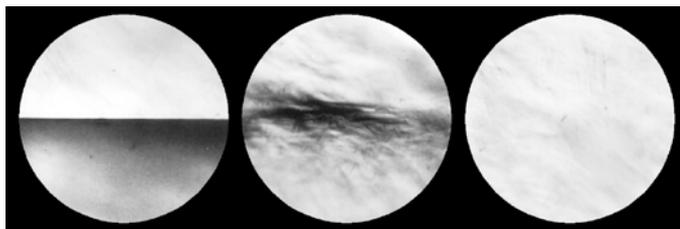
P2.4.3.2

Etude d'un mélange liquide / gaz au point critique - Mesure avec Mobile-CASSY



Etude d'un mélange liquide / gaz au point critique (P2.4.3.1)

N° de cat.	Désignation	P2.4.3.1	P2.4.3.2
371 401	Chambre de pression pour mettre en évidence la température critique	1	1
450 60	Carter de lampe avec câble	1	1
450 511	Ampoules 6 V/ 30 W, E14, jeu de 2	1	1
460 20	Condenseur asphérique	1	1
521 210	Transformateur 6/12 V, 30 W	1	1
460 03	Lentille dans monture $f = +100$ mm	1	1
441 53	Écran, translucide	1	1
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	1	1
460 311	Cavalier avec noix 45/65	3	3
460 312	Cavalier avec noix 45/35	1	1
382 21	Thermomètre agitateur $-10...+110$ °C/1 K	1	
303 28	Générateur de vapeur	1	
667 194	Tuyau silicone 7 mm Ø, 1 m	2	2
664 104	Bécher DURAN, 400 ml, forme basse	1	
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN		1
666 7681	Circulateur chauffant SC 100-S5P		1
675 3410	Eau, pure, 5 l		2



Représentations du contenu de la chambre de pression : au-dessous, à la et au-dessous de la température critique (P2.4.3.1-2)

Le point critique d'un gaz réel se caractérise par la pression critique p_c , la densité critique ρ_c et la température critique T_c . En dessous de la température critique, la substance est gazeuse pour un volume moléculaire suffisamment important - on l'appelle vapeur - et liquide pour un volume moléculaire assez petit. C'est ainsi que l'on a un mélange liquide / vapeur dont la part de vapeur augmente lorsque le volume moléculaire augmente. Comme le liquide et la vapeur n'ont pas la même densité, ils sont séparés l'un de l'autre en un champ de gravitation. Lorsque la température augmente, la densité du liquide diminue et celle de la vapeur augmente jusqu'à ce qu'en fin de compte, les deux densités prennent la valeur de la densité critique pour la température critique. Le liquide et la vapeur se mélangent entièrement entre eux, la limite de phase a disparu. Au-delà de la température critique, la substance est gazeuse indépendamment du volume moléculaire.

Au cours de l'expérience P2.4.3.1 et P2.4.3.2, on étudie l'hexafluorure de soufre aux environs du point critique. La température critique de cette substance est $T_c = 318,7$ K et sa pression critique vaut $p_c = 37,6$ bars. La substance se trouve dans une chambre de pression dans l'enveloppe de laquelle circule de l'eau chaude ou de la vapeur d'eau. On observe par la projection sur un mur à travers deux plaques de verre la disparition de la surface de séparation entre phases liquide et gazeuse lors du chauffage de la substance et l'apparition de la surface de séparation au refroidissement de la substance. Aux environs du point critique, la substance disperse la lumière à ondes courtes de façon particulièrement importante, l'ensemble du contenu de la chambre de pression présente une couleur rouge brune. Cette opalescence critique repose sur des variations de densité qui augmentent considérablement aux environs du point critique.

N.B. : la disparition de la limite de phase est plus facile à observer si la chambre de pression est chauffée le plus lentement possible avec un thermostat à circulation. L'expérience est réalisable avec le générateur de vapeur et la mesure peut être faite avec un thermomètre. Ou bien il est possible d'utiliser un thermostat de circulation et le Mobile-CASSY avec la sonde de température.

LOIS DES GAZ

P2.5.2.1

Variation du volume du gaz en fonction de la pression à température constante (loi de Boyle-Mariotte)

P2.5.2.2

Variation du volume du gaz en fonction de la température à pression constante (loi de Gay-Lussac)

P2.5.2.3

Variation de la pression du gaz en fonction de la température à volume constant (loi d'Amontons)



Variation du volume du gaz en fonction de la pression à température constante (loi de Boyle-Mariotte) (P2.5.2.1)

N° de cat.	Désignation	P2.5.2.1	P2.5.2.2	P2.5.2.3
382 00	Thermomètre à gaz	1	1	1
375 58	Pompe à vide manuelle	1	1	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1	1	1
524 064	Capteur de pression S, ±2 000 hPa	1		1
665 223ET10	Raccord PP en T, 8 mm Ø, lot de 10	1		1
300 02	Pied en V, petit	1	1	1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø	1	1	1
301 11	Noix avec pince	2	2	2
666 767	Plaque chauffante, 1500 W, 185 mm Ø		1	1
664 103	Bécher DURAN, 250 ml, forme basse		1	1

Le thermomètre à gaz est composé d'un tube en verre fermé à l'extrémité inférieure, et à l'extrémité supérieure duquel une bulle de mercure enferme l'air. Le volume de la colonne d'air se détermine d'après sa hauteur et la section du tube de verre. Si l'on modifie la pression à l'extrémité ouverte à l'aide d'une pompe à main, alors la pression à l'extrémité fermée change en conséquence. On peut faire varier la température de l'ensemble du thermomètre à gaz avec un bain marie.

Durant l'expérience P2.5.2.1, la colonne d'air reste à température ambiante constante T . Elle a pour une pression extérieure p_0 un volume V_0 fermé par la bulle de mercure. En enlevant de l'air à l'extrémité ouverte avec la pompe, la pression p dans la colonne d'air est réduite et on détermine le volume V augmenté pour différentes valeurs de p . L'exploitation permet de vérifier la relation

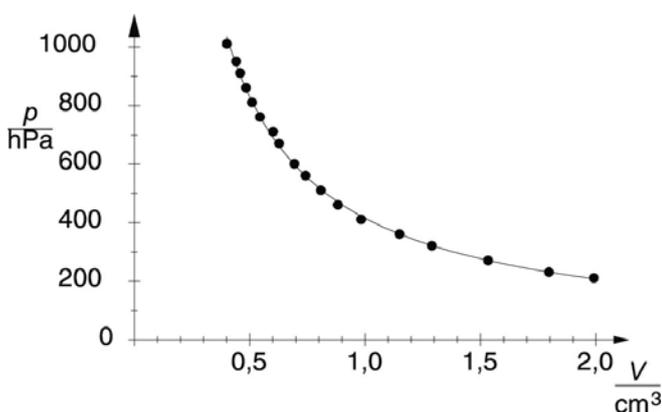
$$p \cdot V = p_0 \cdot V_0 \text{ par } T = \text{const. (Loi de Boyle-Mariotte)}$$

Dans l'expérience P2.5.2.2, le thermomètre à gaz se trouve dans un bain marie tempéré qui refroidit peu à peu. L'extrémité ouverte est en contact avec la pression extérieure, la pression dans la colonne d'air reste ainsi constante. On mesure le volume V de la colonne d'air en fonction de la température T du bain marie. L'exploitation permet de vérifier la relation

$$V \sim T \text{ par } p = \text{const. (Loi de Gay-Lussac)}$$

Au cours de l'expérience P2.5.2.3, on enlève de l'air à l'extrémité ouverte faisant ainsi baisser constamment la pression p dans la colonne d'air, jusqu'à ce que le volume V de la colonne d'air reste constant, même si la température baisse. On mesure la pression p de la colonne d'air en fonction de la température T du bain marie. L'exploitation permet de vérifier la relation

$$p \sim T \text{ par } V = \text{const. (Loi d'Amontons)}$$



Pression en fonction du volume à température constante (P2.5.2.1)

CHALEUR SPÉCIFIQUE DES GAZ

P2.5.3.1

Détermination du rapport c_p/c_v des chaleurs massiques de l'air d'après Rüchardt

P2.5.3.2

Détermination du rapport c_p/c_v des chaleurs massiques de différents gaz avec l'appareil de résonance à colonne à gaz



Détermination du rapport c_p/c_v des chaleurs massiques de l'air d'après Rüchardt (P2.5.3.1)

N° de cat.	Désignation	P2.5.3.1	P2.5.3.2
371 051	Tube à oscillations avec vase de Mariotte	1	
313 27	Chronomètre manuel, 60s/0,2s	1	
317 20	Baromètre anéroïde de précision	1	
590 06	Bécher gradué SAN, 1000 ml	1	
675 3120	Vaseline, 100 g	1	
371 07	Appareil de résonance à colonne à gaz		1
531 120	Multimètre LDanalogue 20		1
522 561	Générateur de fonctions P		1
300 02	Pied en V, petit		1
660 980	Soupape de réglage de précision pour bouteille de gaz comprimé Minican		1
660 985	Bouteille de gaz comprimé Minican, néon		1
660 999	Bouteille de gaz comprimé Minican, dioxyde de carbone		1
665 255	Robinet à 3 voies en T, robinet RN		1
667 194	Tuyau silicone 7 mm Ø, 1 m		1
604 481	Tuyau en caoutchouc 1 m x 4 mm Ø		1
604 510	Raccord de tuyaux, PP, droit, 4/15 mm Ø		1
500 422	Câble de connexion 19 A, 50 cm, bleu		1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire		1

Lors de changements adiabatiques d'état, on a la relation

$$p \cdot V^\kappa = \text{const.}$$

pour la pression p et le volume V d'un gaz, où l'indice adiabatique

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

est le rapport entre les chaleurs massiques c_p et c_v du gaz.

Au cours de l'expérience P2.5.3.1, on détermine l'indice adiabatique de l'air d'après la période d'oscillation d'une sphère. Cette sphère est placée au sommet d'un tube vertical dans lequel elle enferme un volume de gaz. Elle crée des changements adiabatiques d'état du gaz de par ces oscillations de part et d'autre de la position de repos. Une déviation de Δx par rapport à la position de repos entraîne un changement de pression de

$$\Delta p = -\kappa \cdot p \cdot \frac{A \cdot \Delta x}{V}$$

A : section du tube

qui ramène la sphère à sa position de repos. La sphère oscille autour de sa position de repos à la fréquence

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\kappa \cdot p \cdot A^2}{m \cdot V}}$$

Durant l'expérience P2.5.3.2, on détermine l'indice adiabatique à l'aide de l'appareil de résonance à colonne à gaz. Dans ce cas, un piston magnétique qu'un champ magnétique variable force à osciller ferme la colonne d'air. On cherche la fréquence propre f_0 du système, c.-à-d. la fréquence pour laquelle le cylindre oscille avec une amplitude maximale. On peut également remplir le tube avec d'autres gaz que l'air, avec du dioxyde de carbone ou du néon par exemple.



Détermination de l'exposant adiabatique c_p/c_v de divers gaz à l'aide de l'appareil de résonance élastique des gaz (P2.5.3.2).

GAZ RÉELS

P2.5.4.1
Effet Joule-Thomson

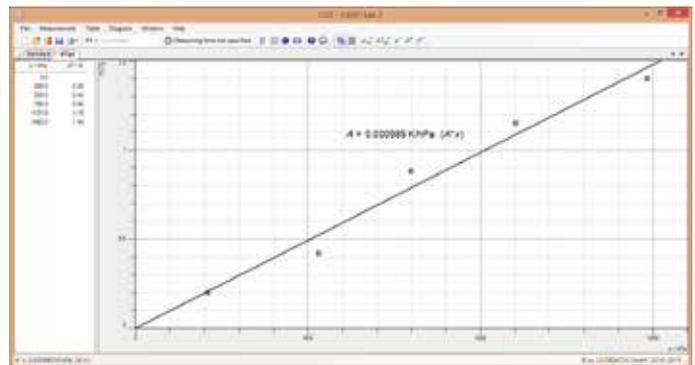


Effet Joule-Thomson (P2.5.4.1)

N° de cat.	Désignation	P2.5.4.1
371 56	Appareil pour l'étude de l'effet Joule-Thomson	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 220	CASSY Lab 2	1
524 045	Adaptateur de température NiCr-Ni/CTN	1
666 216	Thermocouple NiCr-Ni à réponse rapide	2
524 064	Capteur de pression S _i ±2 000 hPa	1
667 186	Tuyau pour vide, 8 mm Ø	1
667 184	Colliers de serrage 10...16 mm, jeu de 10	1
661 017	MANOMETRE POUR DIOXYDE DE CARBONE	1
661 018	MANOMETRE POUR AZOTE,	1
664 569	Clé plate pour bouteilles de gaz comprimé	1
661 0082	Bouteille de gaz, dioxyde de carbone, 2 l	1
661 0083	Bouteille de gaz, azote, 2 l	1
661 021	Support pour bouteille de gaz de 2 l	1
300 01	Pied en V, grand	1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø	1
301 01	Noix Leybold	1
666 555	Pince de serrage universelle 0...80 mm	1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

L'effet Joule-Thomson se manifeste lorsqu'un gaz réel ou un mélange gazeux connaît un changement de température lié à la réduction de la pression p .

Dans l'expérience P2.5.4.1, le flux de gaz acheminé est rétracté et dilaté par une membrane. L'augmentation du volume occupé par le gaz derrière l'obstacle fait en sorte que l'écartement des particules moyen augmente, ceci entraînant une variation de la température du gaz. On détermine la pression et la différence de température en amont et en aval de la membrane.



Variation de température en fonction de la pression (P2.5.4.1)

MOTEUR À AIR CHAUD: ESSAIS QUALITATIFS

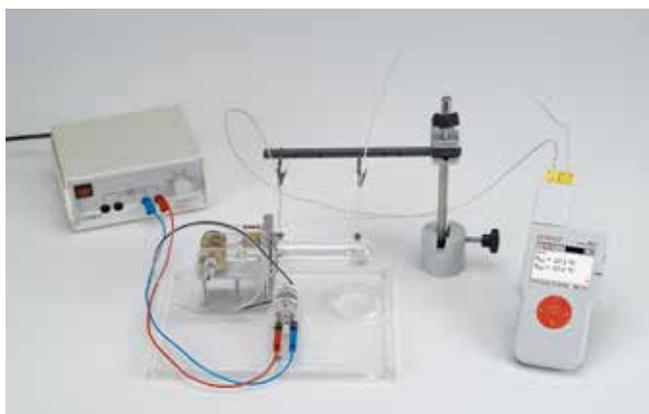
P2.6.1.5

Le moteur à air chaud P utilisé comme moteur thermique, comme pompe à chaleur et comme machine frigorifique



Le moteur à air chaud P utilisé comme moteur thermique, comme pompe à chaleur et comme machine frigorifique (P2.6.1.5)

N° de cat.	Désignation	P2.6.1.5
388 176	Moteur à air chaud P	1
303 22	Brûleur à alcool, en métal	1
521 231	Transformateur variable TBT 3/6/9/12 V	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1
524 0673	Connecteur adaptateur NiCr-Ni S, type K	1
666 1261	Sonde de température NiCr-Ni à réponse rapide, type K	1
300 11	Socle	1
301 01	Noix Leybold	1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	1
590 13	Tige perforée	1
340 89	Coupleur enfichable 4 mm	2
501 861	Pinces crocodile, nues, jeu de 6	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1



Faire fonctionner le moteur à air chaud P comme une pompe à chaleur et un réfrigérateur (P2.6.1.5)

Le moteur à air chaud (*R. Stirling*, 1816) constitue avec la machine à vapeur le plus ancien moteur thermique. Très idéalisé, son cycle thermodynamique est composé d'une compression isotherme à basse température, d'un apport de chaleur isochore, d'une expansion isotherme à haute température et d'une perte de chaleur isochore. Le piston de déplacement et le piston moteur sont reliés à un vilebrequin par des bielles de sorte que le piston de déplacement devance le piston moteur de 90°. Pendant que le piston moteur est au point mort haut (a), le piston de déplacement se meut vers le bas et déplace l'air dans la partie du cylindre chauffée électriquement. Il y est chauffé, se détend et pousse le piston moteur vers le bas (b). Du travail mécanique est ainsi cédé au volant. Pendant que le piston moteur est au point mort bas (c) le piston de déplacement se meut vers le haut et déplace l'air dans la partie du cylindre refroidi par eau. Il y est refroidi et comprimé par le piston moteur (d). Dans ce cas, le volant produit du travail mécanique.

Le moteur à air chaud fonctionne en pompe à chaleur ou en machine frigorifique (selon le sens de rotation du vilebrequin) lorsque son volant est entraîné mécaniquement depuis l'extérieur. Si le piston de déplacement se meut vers le bas pendant que le piston moteur est au point mort bas, alors il déplace l'air vers la partie supérieure du cylindre. L'air est ensuite comprimé par le piston moteur et fournit de la chaleur à la culasse, ce qui signifie que le moteur à air chaud fonctionne en pompe à chaleur. Lorsqu'il fonctionne en sens inverse, l'air est détendu par le piston moteur lorsqu'il se trouve dans la partie supérieure du cylindre, enlevant ainsi de la chaleur à la culasse. Le moteur fonctionne alors en machine frigorifique.

L'expérience P2.6.1.5 étudie qualitativement le fonctionnement du moteur à air chaud P en tant que moteur thermique. Le moteur à air chaud P est un modèle transparent pour montrer les bases de la transformation de l'énergie. Le moteur à air chaud P est alimenté par un brûleur à alcool et transforme, via un petit générateur, l'énergie mécanique en une tension qui peut être mesurée. En outre, le fonctionnement du moteur à air chaud P en tant que pompe à chaleur et machine frigorifique est montré. En faisant varier la vitesse du moteur électrique, c'est-à-dire la puissance mécanique fournie au moteur à air chaud P, on observe l'impact sur la puissance de chauffage ou de réfrigération.



MOTEUR À AIR CHAUD: ESSAIS QUANTITATIFS

P2.6.2.1
Détermination calorique des pertes par friction du moteur à air chaud

P2.6.2.2
Détermination du rendement du moteur à air chaud comme moteur thermique

P2.6.2.3
Détermination du rendement du moteur à air chaud comme machine frigorifique

Détermination calorique des pertes par friction du moteur à air chaud (P2.6.2.1)

N° de cat.	Désignation	P2.6.2.1	P2.6.2.2	P2.6.2.3
388 182	Moteur à air chaud	1	1	1
388 221	Détermination de la puissance, accessoires pour le moteur à air chaud	1	1	1
575 471	Compteur S	1	1	1
337 46	Barrière lumineuse en U	1	1	1
501 16	Câble de connexion, à 6 pôles, 1,50 m	1	1	1
313 27	Chronomètre manuel, 60s/0,2s	1	1	1
382 35	Thermomètre, -10...+50 °C/0,1 K	1	1	1
300 02	Pied en V, petit	1	2	1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	1	1	1
590 06	Bécher gradué SAN, 1000 ml	1	1	1
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	1	1	1
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1	1	1
388 181	Pompe submersible	1*	1*	1*
521 231	Transformateur variable TBT 3/6/9/12 V	1*	1*	1*
667 194	Tuyau silicone 7 mm Ø, 1 m	2*	2*	2*
604 3131	Bidon à col large 10 l	1*	1*	1*
562 11	Noyau en U avec joug		1	
562 121	Agrafe d'assemblage avec pince à ressort		1	
562 21	Bobine secteur à 500 spires		1	
562 18	Bobine très basse tension, 50 spires		1	
531 120	Multimètre LD analog 20		1	
531 130	Multimètre LD analog 30		1	
314 141	Dynamomètre de précision, 1,0 N		1	
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø		1	
300 51	Tige en équerre, 90°		1	
301 01	Noix Leybold		2	
342 63	Masses marquées de 50 g		3	
501 45	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, rouge/bleu, paire		1	
501 33	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, noir		3	2
521 546	Alimentation CC 0...16 V/0...5 A			1

* complément recommandé

Lorsqu'il fonctionne en moteur thermique, le moteur à air chaud enlève par cycle une quantité de chaleur Q_1 d'un réservoir 1, produit le travail mécanique W et fournit à un réservoir 2 la différence $Q_2 = Q_1 - W$. Il fonctionne en machine frigorifique pour le même sens de rotation si un travail mécanique W lui est fourni de l'extérieur. Dans les deux cas, il faut tenir compte du travail W_f de chaque cycle transformé en chaleur, par les frottements du piston dans le cylindre.

Les cycles thermodynamiques sont souvent représentés sous forme de courbes fermées, dans un diagramme pV (p : pression, V : volume). Le travail prélevé du système ou cédé au système, selon le sens du cycle, correspond ainsi à la surface délimitée par la courbe.

Pour déterminer le travail de frottement W_f , on mesure au cours de l'expérience P2.6.2.1 l'élévation de température ΔT_f de l'eau de refroidissement, pendant que le moteur à air chaud a sa culasse ouverte et est entraîné par un moteur électrique.

Au cours de l'expérience P2.6.2.2, on détermine le rendement

$$\eta = \frac{W}{W + Q_2}$$

du moteur à air chaud utilisé comme moteur thermique. Le travail mécanique W cédé à chaque cycle à l'axe peut être calculé d'après le couple de rotation extérieur N d'un frein dynamométrique de Prony qui ralentit le moteur à air chaud à la vitesse de rotation f . La quantité de chaleur Q_2 cédée correspond à une élévation de température ΔT dans l'eau de refroidissement.

Dans l'expérience P2.6.2.3, on détermine le rendement

$$\eta = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

du moteur à air chaud utilisé comme machine frigorifique. Pour cela, le moteur à air chaud a sa culasse fermée et est entraîné par un moteur électrique. On détermine Q_1 comme l'énergie électrique de chauffage qui maintient la température de la culasse constante et égale à la température ambiante.

MOTEUR À AIR CHAUD: ESSAIS QUANTITATIFS

P2.6.2.4
Diagramme pV du moteur à air chaud
comme moteur thermique - tracé et
exploitation avec CASSY



Diagramme pV du moteur à air chaud comme moteur thermique - tracé et exploitation avec CASSY (P2.6.2.4)

N° de cat.	Désignation	P2.6.2.4
388 182	Moteur à air chaud	1
562 11	Noyau en U avec joug	1
562 121	Agrafe d'assemblage avec pince à ressort	1
562 21	Bobine secteur à 500 spires	1
562 18	Bobine très basse tension, 50 spires	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 220	CASSY Lab 2	1
524 082	Capteur de rotation S	1
524 064	Capteur de pression S, ±2 000 hPa	1
309 48	Fil de pêche	1
352 08	Ressort à boudin 25 N/m	1
501 33	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, noir	2
388 181	Pompe submersible	1*
521 231	Transformateur variable TBT 3/6/9/12 V	1*
667 194	Tuyau silicone 7 mm Ø, 1 m	2*
604 3131	Bidon à col large 10 l	1*
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

* complément recommandé

Lorsqu'il fonctionne en moteur thermique, le moteur à air chaud enlève par cycle une quantité de chaleur Q_1 d'un réservoir 1, produit le travail mécanique W et fournit à un réservoir 2 la différence $Q_2 = Q_1 - W$. Il fonctionne en machine frigorifique pour le même sens de rotation si un travail mécanique W_f lui est fourni de l'extérieur. Dans les deux cas, il faut tenir compte du travail W_f de chaque cycle transformé en chaleur, par les frottements du piston dans le cylindre.

Les cycles thermodynamiques sont souvent représentés sous forme de courbes fermées, dans un diagramme pV (p : pression, V : volume). Le travail prélevé du système ou cédé au système, selon le sens du cycle, correspond ainsi à la surface délimitée par la courbe.

Au cours de l'expérience P2.6.2.4, on trace le diagramme pV du moteur à air chaud en tant que moteur thermique à l'aide de l'interface CASSY: un capteur de pression mesure la pression p dans le cylindre en fonction du temps t et un capteur de déplacement enregistre la position s du piston moteur à partir de laquelle le volume V enfermé est calculé. Les données mesurées sont directement représentées sur l'écran dans un diagramme pV. Pour une exploitation ultérieure, on calcule le travail mécanique

$$W = -\int p \cdot dV$$

réalisé sous forme de frottements par le piston à chaque cycle, puis on en déduit la puissance mécanique

$$P = W \cdot f$$

f : vitesse de rotation \pm vide

que l'on reporte ensuite dans un diagramme en fonction de la vitesse de rotation à vide.

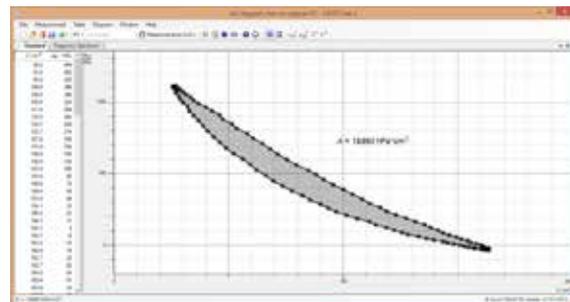


Diagramme pV du moteur à air chaud (P2.6.2.4)

POMPE À CHALEUR

P2.6.3.1

Détermination du coefficient d'efficacité de la pompe à chaleur en fonction de la différence de température

P2.6.3.2

Etude du fonctionnement de la vanne de détente de la pompe à chaleur

P2.6.3.3

Analyse du cycle de la pompe à chaleur avec le diagramme de Mollier



Détermination du coefficient d'efficacité de la pompe à chaleur en fonction de la différence de température (P2.6.3.1)

N° de cat.	Désignation	P2.6.3.1	P2.6.3.2	P2.6.3.3
389 521	Pompe à chaleur	1	1	1
531 831	Joulemètre-wattmètre	1	1	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1	1	1
524 0673	Connecteur adaptateur NiCr-Ni S, type K	1	1	1
529 676	Sonde de température NiCr-Ni, 1,5 mm, type K	2	2	3
313 12	Chronomètre numérique manuel	1	1	1

La pompe à chaleur enlève de la chaleur d'un réservoir à la température T_1 par évaporation d'un agent réfrigérant et fournit de la chaleur à un réservoir à la température T_2 par condensation d'un agent réfrigérant. Pour cela, on chauffe fortement un agent réfrigérant par compression (a - b) à l'aide d'un compresseur. Il se condense dans le liquéfacteur (c - d) et cède la chaleur de condensation libérée ΔQ_2 au réservoir T_2 . L'agent réfrigérant liquéfié est transmis sans bulles à la vanne de détente (e - f). C'est là qu'est dosé l'agent réfrigérant délivré à l'évaporateur (g - h). Dans l'évaporateur, l'agent réfrigérant repasse en phase gazeuse en prélevant au réservoir T_1 a chaleur d'évaporation ΔQ_1 nécessaire.

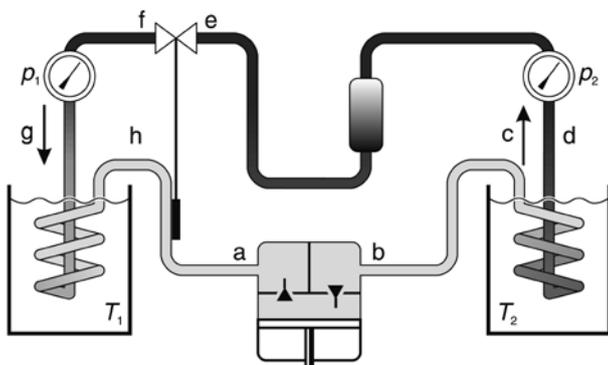
L'objet de l'expérience P2.6.3.1 est de déterminer le coefficient d'efficacité

$$\varepsilon = \frac{\Delta Q_2}{\Delta W}$$

de la pompe à chaleur en fonction de la différence de température $\Delta T = T_2 - T_1$. On détermine la quantité de chaleur cédée ΔQ_2 d'après l'échauffement du réservoir d'eau T_2 puis l'énergie électrique consommée ΔW l'aide d'un joulemètre et wattmètre.

Au cours de l'expérience P2.6.3.2, on trace les températures T_f et T_h aux sorties de la vanne de détente et de l'évaporateur. Si la différence entre les deux températures dépasse négativement une valeur limite, la vanne de détente limite alors l'apport de l'agent réfrigérant à l'évaporateur. Il est ainsi garanti que l'agent réfrigérant s'évapore totalement dans l'évaporateur.

Dans l'expérience P2.6.3.3, on suit les transformations d'énergie dans la pompe à chaleur grâce à un diagramme de Mollier, dans lequel la pression p est portée en fonction de l'enthalpie spécifique h de l'agent réfrigérant. Les enthalpies correspondantes h_a, h_b, h_c et h_f sont déterminées aussi bien d'après les pressions p_1 et p_2 dans l'évaporateur et le liquéfacteur que d'après les températures T_a, T_b, T_c et T_f du réfrigérant. On mesure en outre les quantités de chaleur ΔQ_2 et ΔQ_1 cédées ou consommées par unité de temps. On en déduit la quantité Δm d'agent réfrigérant transformée par unité de temps.

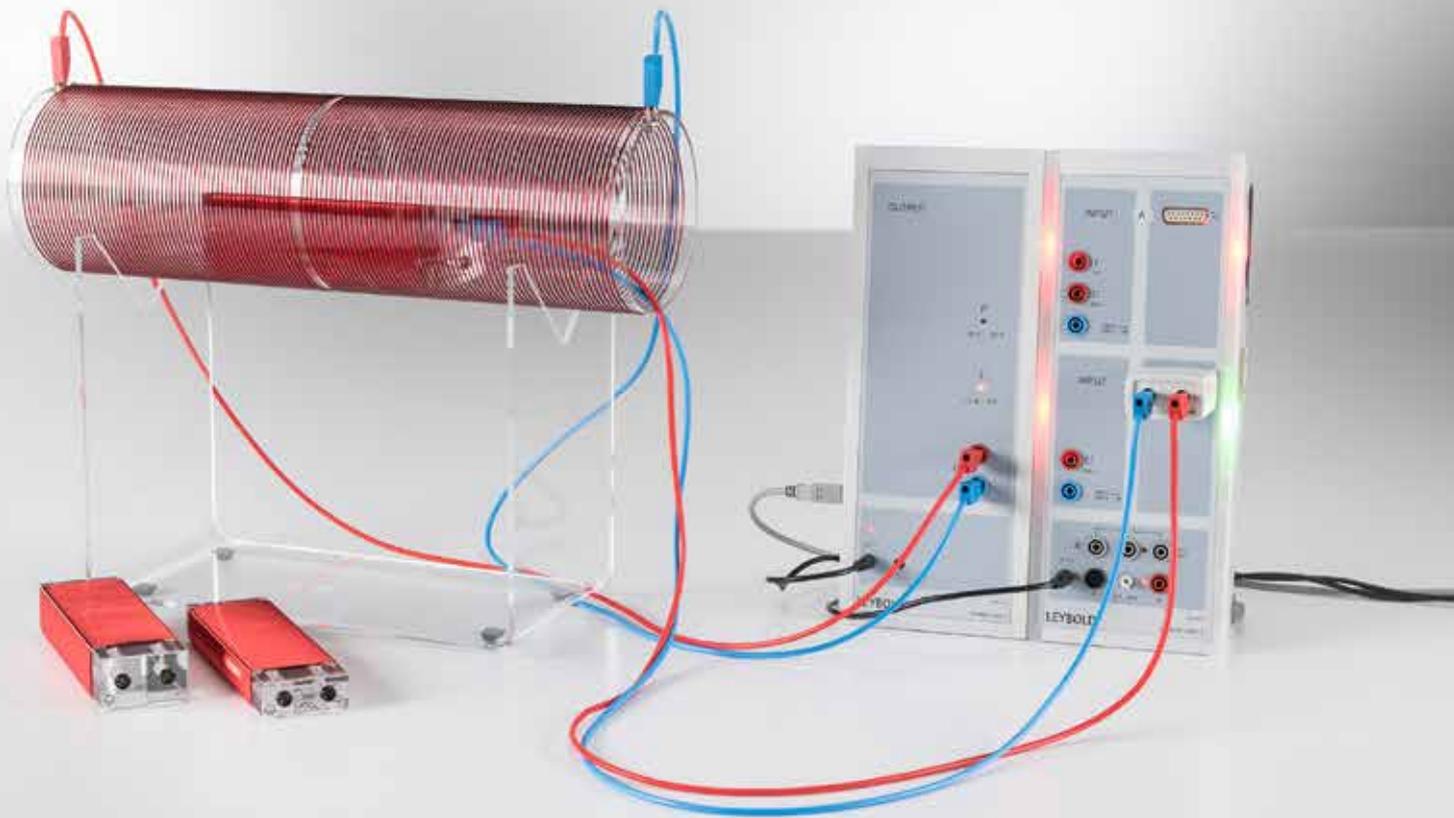


Pompe à chaleur (389 521) avec représentation schématique des différents composants (P2.6.3.1)

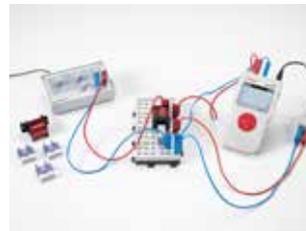
P3.4.3.2

Mesure de la force électromotrice induite dans une boucle conductrice pour un champ magnétique variable - avec Power-CASSY comme source de courant variable

Pour plus d'informations sur cette expérience, rendez-vous à la page 105.

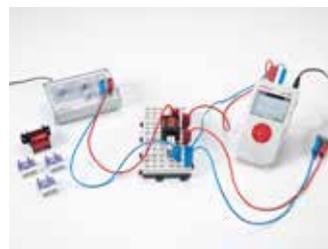


P3 ELECTRICITÉ



P3.1	ELECTROSTATIQUE	81
P3.2	NOTIONS DE BASE EN ÉLECTRICITÉ	93
P3.3	MAGNÉTOSTATIQUE	98
P3.4	INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE	103
P3.5	MACHINES ÉLECTRIQUES	109
P3.6	CIRCUITS À COURANT CONTINU ET ALTERNATIF	112
P3.7	OSCILLATIONS ET ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES	118
P3.8	PORTEURS DE CHARGE EN MOUVEMENT DANS LE VIDE	124
P3.9	CONDUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ DANS LES GAZ	127

P3 ELECTRICITÉ



P3.1 ELECTROSTATIQUE

P3.1.1	Expériences de base en électrostatique	81
P3.1.2	Loi de Coulomb	82-83
P3.1.3	Lignes de champ et lignes équipotentielles	84-85
P3.1.4	Actions des forces dans un champ électrique	86-87
P3.1.5	Répartitions de la charge sur des conducteurs électriques	88
P3.1.6	Définition de la capacité	89
P3.1.7	Condensateur à plaques	90-92

P3.2 NOTIONS DE BASE EN ÉLECTRICITÉ

P3.2.2	Loi d'Ohm	93
P3.2.3	Lois de Kirchhoff	94-95
P3.2.4	Circuit d'instruments de mesure électriques	96
P3.2.5	Conduction de l'électricité par électrolyse	97

P3.3 MAGNÉTOSTATIQUE

P3.3.1	Expériences de base en magnétostatique	98
P3.3.3	Actions des forces dans un champ magnétique	99-100
P3.3.4	Loi de Biot-Savart	101-102

P3.4 INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

P3.4.1	Choc de tension	103
P3.4.2	Induction dans une boucle conductrice en mouvement	104
P3.4.3	Induction par variation du champ magnétique	105
P3.4.5	Transformateur	106-107
P3.4.6	Mesure du champ géomagnétique	108

P3.5 MACHINES ÉLECTRIQUES

P3.5.2	Générateurs électriques	109
P3.5.3	Moteurs électriques	110
P3.5.4	Machines à courant triphasé	111

P3.6 CIRCUITS À COURANT CONTINU ET ALTERNATIF

P3.6.1	Circuits électriques avec un condensateur	112
P3.6.2	Circuits électriques avec une bobine	113
P3.6.3	Résistances de courant alternatif	114
P3.6.4	Circuits de ponts de mesure	115
P3.6.6	Travail électrique et puissance	116-117

P3.7 OSCILLATIONS ET ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

P3.7.1	Circuit oscillant électromagnétique	118
P3.7.2	Ondes décimétriques	119
P3.7.3	Propagation des ondes décimétriques le long de lignes	120
P3.7.4	Micro-ondes	121
P3.7.5	Propagation des micro-ondes le long des lignes	122
P3.7.6	Directivité d'une radiation de dipôle	123

P3.8 PORTEURS DE CHARGE EN MOUVEMENT DANS LE VIDE

P3.8.3	Tube à croix de Malte	124
P3.8.4	Tube de Perrin	125
P3.8.5	Tube de Thomson	126

P3.9 CONDUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ DANS LES GAZ

P3.9.2	Décharge gazeuse à faible pression	127
--------	------------------------------------	-----

EXPÉRIENCES DE BASE EN
ÉLECTROSTATIQUE

P3.1.1.2
Expériences de base en électrostatique
avec l'amplificateur électromètre



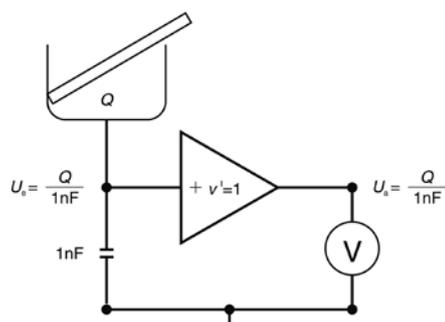
Expériences de base en électrostatique avec l'amplificateur électromètre (P3.1.1.2)

N° de cat.	Désignation	P3.1.1.2
532 14	Amplificateur électromètre	1
562 791	Adaptateur secteur 12 V CA	1
578 25	Condensateur 1 nF, STE 2/19	1
578 10	Condensateur 10 nF, STE 2/19	1
532 16	Tige de raccordement	1
531 120	Multimètre LDanalog 20	1
541 00	Bâtonnets de friction, PVC et plexiglas	1
541 22	Peau de cuir	1
686 63	Feuilles de polyéthylène, jeu de 10	1
546 12	Cage de Faraday	1
590 011	Fiche de fixation	1
542 51	Plaque à influence 8 cm x 4 cm	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1
500 424	Câble de connexion 19 A, 50 cm, noir	1
666 711	Bec autonome à butagaz	1*
666 712ET3	Cartouche de gaz butane, 190 g, lot de 3	1*

* complément recommandé

L'amplificateur électromètre est un convertisseur d'impédance avec une entrée de tension à impédance très élevée ($\geq 10^{13} \Omega$) et une sortie de tension à basse impédance ($\leq 1 \Omega$). Il convient particulièrement bien pour mesurer de très petites charges en cas de branchement capacitif de l'entrée et d'utilisation d'une cage de Faraday pour collecter les charges. Il est possible d'effectuer des expériences sur l'électricité par contact ou par frottement.

L'expérience P3.1.1.2 consiste à étudier la séparation de charges par frottement mutuel de deux corps: on démontre qu'un corps porte des charges positives et l'autre des charges négatives, avec des quantités d'électricité égales en valeur absolue. Si l'on mesure simultanément les charges des deux corps, leur action se compense. Le signe de la charge ne dépend pas uniquement du corps lui-même, mais également de la matière du deuxième corps.



Mesure des charges avec l'amplificateur électrométrique (P3.1.1.2).

LOI DE COULOMB

P3.1.2.2

Vérification de la loi de Coulomb -
mesure avec le capteur de force



Vérification de la loi de Coulomb - mesure avec le capteur de force (P3.1.2.2)

N° de cat.	Désignation	P3.1.2.2
314 263	Jeu de corps conducteurs	1
337 00	Chariot de mesure	1
460 82	Rail métallique de précision, 50 cm	1
460 95	Cavalier	2
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1
524 060	Capteur de forces S, ±1 N	1
521 721	Alimentation haute tension 25 kV	1
501 051	Câble haute tension, 1,5 m	1
590 13	Tige perforée	1
300 11	Socle	1
590 02	Fiche à ressort, petite	1
532 14	Amplificateur électromètre	1
562 791	Adaptateur secteur 12 V CA	1
578 25	Condensateur 1 nF, STE 2/19	1
578 10	Condensateur 10 nF, STE 2/19	1
546 12	Cage de Faraday	1
590 011	Fiche de fixation	1
532 16	Tige de raccordement	1
300 02	Pied en V, petit	1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	1
301 01	Noix Leybold	1
501 45	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, rouge/bleu, paire	1
500 424	Câble de connexion 19 A, 50 cm, noir	1
501 42	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, jaune/vert	1
500 610	Câble de connexion de sécurité, 25 cm, jaune/vert	1
500 640	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, jaune/vert	1

La force ci-dessous s'applique selon la loi de Coulomb entre deux charges ponctuelles Q_1 et Q_2 distantes de r .

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

avec $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$ (constante de champ Électrique)

La même force agit entre deux sphères électrisées si la distance qui sépare les centres est nettement supérieure au diamètre, de telle sorte que la charge uniforme des sphères ne change pas. Dans ce cas précis, les sphères peuvent donc être considérées comme ponctuelles.

La force de Coulomb entre deux sphères électrisées peut également être mesurée avec le capteur de force. Il est composé de deux lames souples parallèles avec quatre jauges extensométriques en montage en pont, qui changent de résistance électrique sous l'effet de la charge. Le changement de résistance est proportionnel à la force appliquée.

Dans l'expérience P3.1.2.2, le capteur de force est branché à un instrument de mesure qui indique directement la force. Aucun calibrage n'est nécessaire. La force de Coulomb est mesurée en fonction de la distance r qui sépare les centres des sphères, de la charge Q_1 de la première sphère et de la charge Q_2 de la deuxième sphère. Les charges des sphères sont mesurées avec un amplificateur électromètre branché en coulombmètre. La mesure et l'exploitation s'effectuent manuellement point par point. Le but de l'exploitation est de confirmer les proportionalités

$$F \propto \frac{1}{r^2}, \quad F \propto Q_1 \quad \text{et} \quad F \propto Q_2$$

et de déterminer la constante de champ électrique ϵ_0 .

LOI DE COULOMB

P3.1.2.3
Vérification de la loi de Coulomb -
tracé et exploitation avec CASSY



Vérification de la loi de Coulomb - tracé et exploitation avec CASSY (P3.1.2.3)

N° de cat.	Désignation	P3.1.2.3
314 263	Jeu de corps conducteurs	1
337 00	Chariot de mesure	1
460 82	Rail métallique de précision, 50 cm	1
460 95	Cavalier	2
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 220	CASSY Lab 2	1
524 060	Capteur de forces S, ±1 N	1
524 082	Capteur de rotation S	1
521 721	Alimentation haute tension 25 kV	1
501 051	Câble haute tension, 1,5 m	1
590 13	Tige perforée	1
300 11	Socle	1
590 02	Fiche à ressort, petite	1
532 14	Amplificateur électromètre	1
562 791	Adaptateur secteur 12 V CA	1
578 25	Condensateur 1 nF, STE 2/19	1
578 10	Condensateur 10 nF, STE 2/19	1
531 120	Multimètre LDanalog 20	1
546 12	Cage de Faraday	1
590 011	Fiche de fixation	1
532 16	Tige de raccordement	1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	1
300 02	Pied en V, petit	1
301 01	Noix Leybold	1
337 04	Masses d'entraînement, jeu	1
301 07	Pince de table simple	1
309 48	Fil de pêche	1
501 45	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, rouge/bleu, paire	1
500 424	Câble de connexion 19 A, 50 cm, noir	1
501 43	Câble d'expérimentation 32 A, 200 cm, jaune/vert	1

N° de cat.	Désignation	P3.1.2.3
500 610	Câble de connexion de sécurité, 25 cm, jaune/vert	1
500 640	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, jaune/vert	1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

La force de Coulomb entre deux sphères électrisées peut également être mesurée avec le capteur de force. Il est composé de deux lames souples parallèles avec quatre jauges extensométriques en montage en pont, qui changent de résistance électrique sous l'effet de la charge. Le changement de résistance est proportionnel à la force appliquée.

Pour l'expérience P3.1.2.3, on emploie le logiciel CASSY Lab pour tracer et exploiter les résultats des mesures. On mesure la force de Coulomb pour différentes charges Q_1 et Q_2 en fonction de la distance r . Les charges des sphères sont mesurées avec un amplificateur électromètre branché en coulombmètre. Le but de l'exploitation est de confirmer la proportionnalité

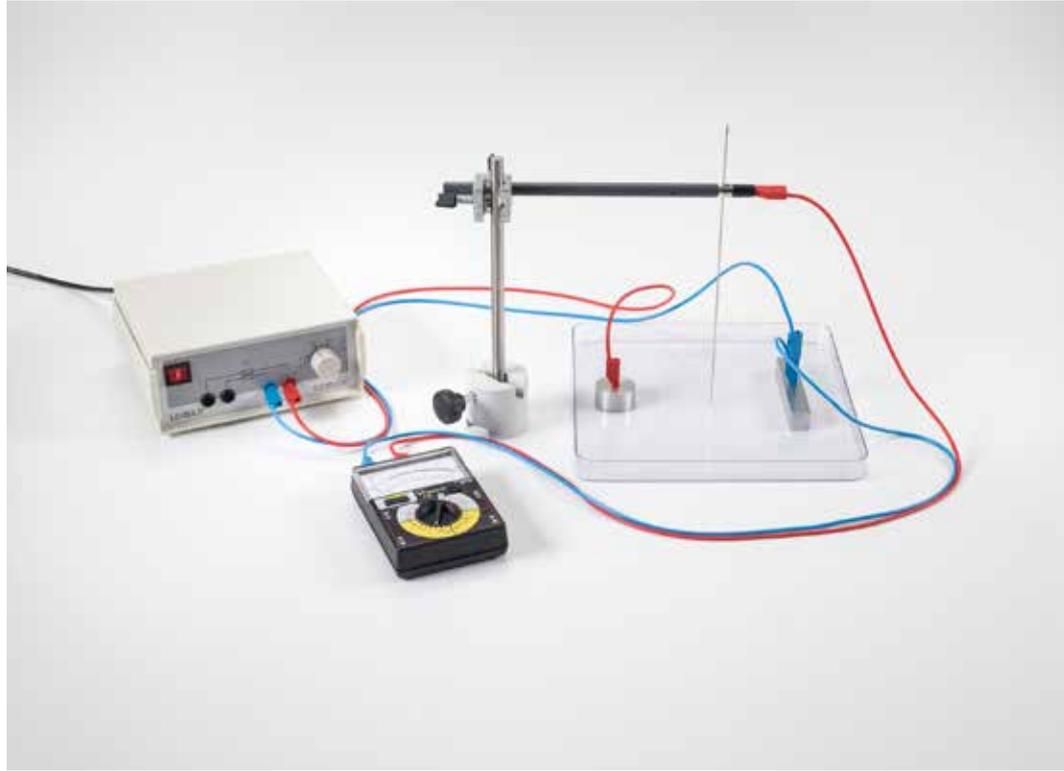
$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

et de déterminer la constante de champ électrique ϵ_0 .

LIGNES DE CHAMP ET LIGNES ÉQUIPOTENTIELLES

P3.1.3.1
Représentation de lignes de champ électriques

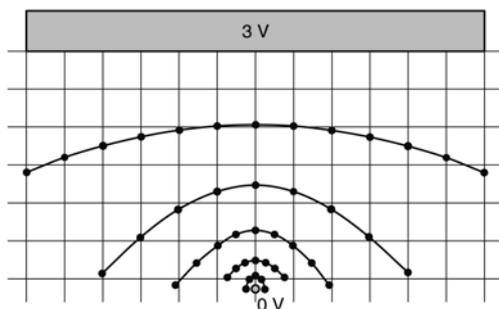
P3.1.3.2
Représentation des lignes équipotentielles de champs électriques



Représentation des lignes équipotentielles de champs électriques (P3.1.3.2)

N° de cat.	Désignation	P3.1.3.1	P3.1.3.2
541 06	Équipement lignes de champ électrique	1	
501 051	Câble haute tension, 1,5 m	2	
521 70	Alimentation haute tension 10 kV	1	
MIK 74708	BMS SyncCam 8 mégapixels	1*	
545 09	Cuve électrolytique		1
501 861	Pinces crocodile, nues, jeu de 6		1
521 231	Transformateur variable TBT 3/6/9/12 V		1
531 120	Multimètre LDanalog 20		1
590 011	Fiche de fixation		1
590 13	Tige perforée		1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø		1
301 01	Noix Leybold		1
300 11	Socle		1
501 461	Câbles d'expérimentation 19 A, 100 cm, noirs, paire		2
	En complément : Ordinateur ou appareil d'affichage d'images	1	

* complément recommandé



Exemple de mesure : lignes équipotentielles autour d'une pointe d'aiguille (P3.1.3.2).

L'effet de force mutuel entre les charges électriques peut être décrit par un champ électrique. Le champ électrique est présent même lorsqu'il n'est pas caractérisé par la force sur une charge d'essai. La meilleure description que l'on peut en faire est donnée par les lignes de champ qui suivent la direction de l'intensité du champ électrique. L'allure des lignes de champ est déterminée par la disposition spatiale des charges génératrices du champ.

Dans la coupe bidimensionnelle d'un champ électrique, les points de même potentiel forment une ligne. L'allure de telles lignes équipotentielles est, comme pour les lignes de champ, déterminée par la disposition spatiale des charges électriques génératrices du champ.

L'expérience P3.1.3.1 consiste à employer des fines particules dans une coupelle remplie d'huile pour la représentation des lignes de champ. Les particules s'orientent dans le champ électrique et forment des chaînes le long des lignes de champ. Pour produire des champs électriques d'orientation différente, quatre paires d'électrodes distinctes sont disponibles. Ces électrodes sont disposées sous la coupelle et sont alimentées par du courant haute tension pouvant aller jusqu'à 10 kV. Il s'agit de plaques sérigraphiées avec deux sphères, une sphère devant une plaque, un condensateur à plaques et un condensateur cylindrique.

L'expérience P3.1.3.2 consiste à mesurer les lignes équipotentielles de différents corps électrisés. Pour ce faire, on applique une tension sur des paires d'électrodes dans une cuve électrolytique remplie d'eau distillée. Pour éviter des changements de potentiel par électrolyse sur les électrodes, on opère avec du courant alternatif. Un voltmètre mesure la différence de potentiel entre l'électrode 0 V et une aiguille en acier trempée dans l'eau. Pour la représentation des lignes équipotentielles, on recherche les points avec la même différence de potentiel et on les trace sur du papier millimétré. Ainsi on peut observer des coupes bidimensionnelles d'un champ électrique dans un condensateur à plaques ou dans une cage de Faraday, et des coupes d'un dipôle, d'une charge image et d'une petite courbure.

LIGNES DE CHAMP ET LIGNES ÉQUIPOTENTIELLES

P3.1.3.3

Mesure du potentiel dans les condensateurs à plaques

P3.1.3.4

Mesure du potentiel tout autour de la sphère chargée



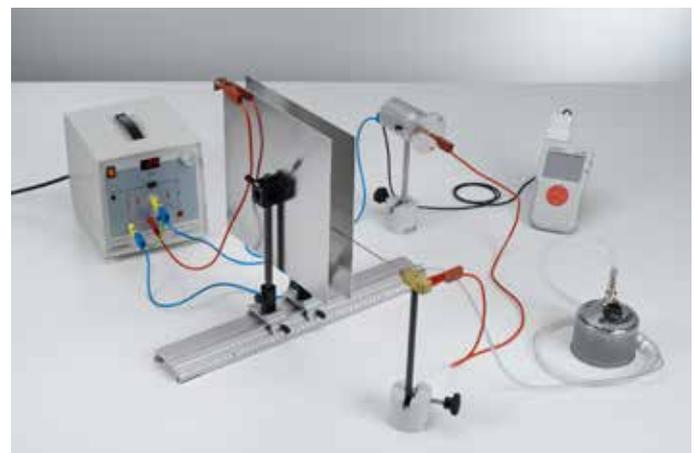
Mesure du potentiel tout autour de la sphère chargée (P3.1.3.4)

N° de cat.	Désignation	P3.1.3.3	P3.1.3.4
524 080	Mesureur de champ électrique S	1	1
540 540	Accessoires pour le mesureur de champ électrique S	1	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1	1
311 02	Règle métallique, 1 m	1	1
521 70	Alimentation haute tension 10 kV	1	1
460 317	Banc d'optique, profil S1, 0,5 m	1	
460 312	Cavalier avec noix 45/35	2	
300 11	Socle	2	3
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	2	
301 01	Noix Leybold	1	
500 600	Câble d'expérimentation de sécurité, 10 cm, jaune/vert	1	1
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	1	
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	1	1
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	1	1
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1	1
667 193	Tuyau PVC, 7 mm Ø, 1 m	1	1
666 716	Vanne pour cartouche de gaz	1	1
666 715	Cartouche de gaz	1	1
543 021	Sphère sur support isolant		1
500 95	Douilles d'adaptation de sécurité, rouges (6)		1

Une sonde à flammes permet d'analyser le potentiel dans les trois sens autour d'un corps électrisé et de déterminer les surfaces équipotentielles.

Dans l'expérience P3.1.3.3 on détermine le potentiel dans le condensateur à plateaux. Pour déterminer les surfaces équipotentielles parallèles aux plateaux condensateurs, on mesure le potentiel à différents points à distance constante aux plateaux condensateurs. En plus, on mesure le changement du potentiel dépendant de la distance aux plateaux condensateurs et par suite le potentiel du champs électrique.

L'expérience P3.1.3.4 se consacre à déterminer le potentiel autour d'une sphère électrisée. Pour analyser les surfaces équipotentielles se déroulant en coupes autour de la sphère électrisée, on mesure le potentiel à différents points et à distance constante aux plateaux condensateurs. De plus, on mesure le changement du potentiel dépendant de la distance à la sphère électrisée pour déterminer le potentiel du champ électrique.



Mesure du potentiel à l'intérieur d'un condensateur à plaques (P3.1.3.3).

ACTIONS DES FORCES DANS UN CHAMP ÉLECTRIQUE

P3.1.4.2

Electromètre absolu de Kirchoff: mesure de la force entre les plaques électrisées d'un condensateur - mesure avec le capteur de force

P3.1.4.3

Mesure de la force entre une sphère électrisée et une plaque de métal - mesure avec le capteur de force



Electromètre absolu de Kirchoff: mesure de la force entre les plaques électrisées d'un condensateur - mesure avec le capteur de force (P3.1.4.2)

N° de cat.	Désignation	P3.1.4.2	P3.1.4.3
516 37	Électrostatique avec la balance électrodynamique, accessoires	1	1
516 31	Support à hauteur variable	1	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1	1
524 060	Capteur de forces $S_1 \pm 1$ N	1	1
314 265	Support de boucle conductrice	1	1
521 70	Alimentation haute tension 10 kV	1	
300 02	Pied en V, petit	1	1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø	1	1
301 01	Noix Leybold	1	1
500 98	Douilles d'adaptation de sécurité, noires (6)	1	
500 610	Câble de connexion de sécurité, 25 cm, jaune/vert	1	
500 620	Câble de connexion de sécurité 50 cm, jaune/vert	1	
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	2	
541 00	Bâtonnets de friction, PVC et plexiglas		1
541 22	Peau de cuir		1
500 440	Câble d'expérimentation 19 A, 100 cm, jaune/vert		1

Dans un champ électrique homogène, la force F sur un corps électrisé dilaté est proportionnelle à la charge totale Q et à l'intensité du champ électrique E . D'où la relation

$$F = Q \cdot E$$

La force dans le champ électrique peut se mesurer avec un capteur de force relié à un instrument de mesure. Il est composé de deux lames souples parallèles avec quatre jauges extensométriques en montage en pont qui changent de résistance électrique sous l'effet de la charge. Le changement de résistance est proportionnel à la force appliquée. L'instrument de mesure indique directement la force à mesurer.

Dans l'expérience P3.1.4.2 on monte un électromètre absolu de Kirchoff pour mesurer la force

$$F = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{U^2}{d^2} \cdot A$$

$$\text{avec } \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \text{ (constante de champ Électrique)}$$

entre les plaques électrisées d'un condensateur. La mesure s'effectue pour une surface A donnée, en fonction de l'écartement des plaques d et de la tension U . Le but de l'exploitation est de confirmer les proportionalités

$$F \propto \frac{1}{d^2} \text{ et } F \propto U^2$$

et de déterminer la constante de champ électrique ϵ_0 .

L'expérience P3.1.4.3 consiste à étudier le principe de la charge image de manière expérimentale. Pour ce faire, on mesure la force d'attraction sur une sphère électrisée, placée devant une plaque métallique. La force correspond à la force d'une charge de valeur égale et de signe opposé à une distance double $2d$. Elle est donc donnée par la relation

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q^2}{(2d)^2}$$

On mesure d'abord la force pour une charge Q donnée en fonction de la distance d . On refait ensuite la mesure avec une charge réduite de moitié. Le but de l'exploitation est de confirmer les proportionalités.

$$F \propto \frac{1}{d^2} \text{ et } F \propto Q^2$$

ACTIONS DES FORCES DANS UN CHAMP ÉLECTRIQUE

P3.1.4.4

Mesure de la force exercée sur une charge électrique dans un champ électrique homogène - mesure avec le capteur de force



Mesure de la force exercée sur une charge électrique dans un champ électrique homogène - mesure avec le capteur de force (P3.1.4.4)

N° de cat.	Désignation	P3.1.4.4
544 22	Condensateur à plaques	1
314 263	Jeu de corps conducteurs	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1
524 060	Capteur de forces S, ±1 N	1
521 70	Alimentation haute tension 10 kV	1
541 00	Bâtonnets de friction, PVC et plexiglas	1
541 22	Peau de cuir	1
590 02	Fiche à ressort, petite	1
300 02	Pied en V, petit	1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø	1
301 01	Noix Leybold	1
500 610	Câble de connexion de sécurité, 25 cm, jaune/vert	1
500 640	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, jaune/vert	1
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	1
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1

L'expérience P3.1.4.4 consiste à amener une charge Q la plus grande possible sur une cuillère électrostatique plate au moyen d'une tige en plastique frottée. La cuillère se trouve dans le champ électrique d'un condensateur à plaques et est disposée parallèlement aux plaques. Pour vérifier la proportionnalité entre la force et l'intensité du champ, on mesure la force F sur la cuillère en fonction de la tension U du condensateur, pour un écartement des plaques d connu. On détermine le champ électrique E avec la relation

$$E = \frac{U}{d}$$

RÉPARTITIONS DE LA CHARGE SUR DES CONDUCTEURS ÉLECTRIQUES

P3.1.5.1
Étude de la répartition des charges à la surface de conducteurs électriques

P3.1.5.2
Étude de l'influence avec les hémisphères de Cavendish



Étude de l'influence avec les hémisphères de Cavendish (P3.1.5.2)

N° de cat.	Désignation	P3.1.5.1	P3.1.5.2
543 071	Conducteur conique sur support isolant	1	
546 12	Cage de Faraday	2	
542 52	Plaquette d'essai, 4 cm x 4 cm	1	
521 70	Alimentation haute tension 10 kV	1	1
501 051	Câble haute tension, 1,5 m	1	1
532 14	Amplificateur électromètre	1	1
562 791	Adaptateur secteur 12 V CA	1	1
578 25	Condensateur 1 nF, STE 2/19	1	1
578 10	Condensateur 10 nF, STE 2/19	1	1
531 120	Multimètre LDanalog 20	1	1
590 011	Fiche de fixation	1	
532 16	Tige de raccordement	1	1
540 52	Isolateur pour l'expérimentation	1	
501 861	Pinces crocodile, nues, jeu de 6	1	
300 11	Socle	1	3
500 610	Câble de connexion de sécurité, 25 cm, jaune/vert	1	1
501 45	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, rouge/bleu, paire	1	1
500 424	Câble de connexion 19 A, 50 cm, noir	1	1
501 42	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, jaune/vert	1	1
543 021	Sphère sur support isolant		1
543 05	Hémisphères de Cavendish, paire		1
340 89	Coupleur enfichable 4 mm		1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø		2
301 01	Noix Leybold		2
590 13	Tige perforée		1

A l'équilibre statique, l'intérieur d'un conducteur métallique ou d'un corps creux ne contient ni champs électriques, ni charges électriques libres. Des charges libres se répartissent sur la surface extérieure du conducteur de manière à ce que l'intensité du champ électrique soit partout orientée perpendiculairement à la surface et que tous les points aient le même potentiel.

Dans l'expérience P3.1.5.1, on prélève la charge électrique d'un corps creux métallique chargé à l'aide d'une plaquette d'essai afin de la mesurer avec un coulombmètre. Il s'avère que la densité de charge augmente au fur et à mesure que le rayon de courbure de la surface diminue. On met par ailleurs en évidence qu'il est impossible de prélever la charge de l'intérieur du corps creux.

Dans l'expérience P3.1.5.2 on fait appel à une expérience historique de Cavendish. Une sphère métallique est placée sur un pied, et enfermée sans contact dans deux hémisphères creuses. Si l'on charge une des deux hémisphères, la charge se répartit uniformément sur les deux sans que la sphère intérieure ne se charge. Si l'on charge la sphère intérieure au préalable et qu'on l'enferme dans les deux hémisphères, les hémisphères présentent à nouveau la même charge alors que la sphère intérieure ne possède aucune charge.

DÉFINITION DE LA CAPACITÉ

P3.1.6.1

Détermination de la capacité d'une sphère dans un espace libre

P3.1.6.2

Détermination de la capacité d'une sphère devant une plaque métallique



Détermination de la capacité d'une sphère dans un espace libre (P3.1.6.1)

N° de cat.	Désignation	P3.1.6.1	P3.1.6.2
543 00	Sphères conductrices, jeu de 3	1	1
521 70	Alimentation haute tension 10 kV	1	1
501 051	Câble haute tension, 1,5 m	1	1
532 14	Amplificateur électromètre	1	1
562 791	Adaptateur secteur 12 V CA	1	1
578 25	Condensateur 1 nF, STE 2/19	1	1
578 10	Condensateur 10 nF, STE 2/19	1	1
531 120	Multimètre LDanalog 20	1	1
546 12	Cage de Faraday	1	1
590 011	Fiche de fixation	1	1
532 16	Tige de raccordement	1	1
590 13	Tige perforée	1	1
300 11	Socle	2	3
500 610	Câble de connexion de sécurité, 25 cm, jaune/vert	1	1
501 45	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, rouge/bleu, paire	1	1
500 424	Câble de connexion 19 A, 50 cm, noir	1	1
501 43	Câble d'expérimentation 32 A, 200 cm, jaune/vert	1	1
587 66	Plaque réfléchissante		1
501 861	Pincettes crocodile, nues, jeu de 6		1
311 78	Mètre ruban 2 m		1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø		1
501 33	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, noir		1

La différence de potentiel U d'un conducteur électrisé et isolé dans un espace libre par rapport à un point de référence à une distance infinie est proportionnelle à la charge Q du corps. On a

$$Q = C \cdot U$$

avec C la capacité du corps. Ainsi la capacité d'une sphère de rayon r dans un espace libre sera

$$C = 4\pi\epsilon_0 \cdot r$$

car la différence de potentiel d'une sphère électrisée par rapport à un point de référence à une distance infinie est

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r}$$

avec $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$ (constante de champ Électrique)

L'expérience P3.1.6.1 consiste à déterminer la capacité d'une sphère dans un espace libre, en électrisant la sphère avec une haute tension U connue et en mesurant sa charge Q avec un amplificateur électromètre branché en coulombmètre. La mesure se fait pour différents rayons r . Le but de l'exploitation est de confirmer les proportionnalités

$$Q \propto U \text{ et } C \propto r$$

L'expérience P3.1.6.2 montre que la capacité d'un corps dépend aussi de son environnement, par exemple de la distance à d'autres conducteurs reliés à la terre. Pour ce faire, on dispose des sphères de rayons r à une distance s d'une plaque métallique reliée à la terre, et on les électrise avec une haute tension U . La capacité du dispositif est donc

$$C = 4\pi\epsilon_0 \cdot r \cdot \left(1 + \frac{r}{2s}\right)$$

Le but de l'exploitation est de confirmer la proportionnalité entre la charge Q et la différence de potentiel U pour une distance s quelconque entre la sphère et la plaque métallique.

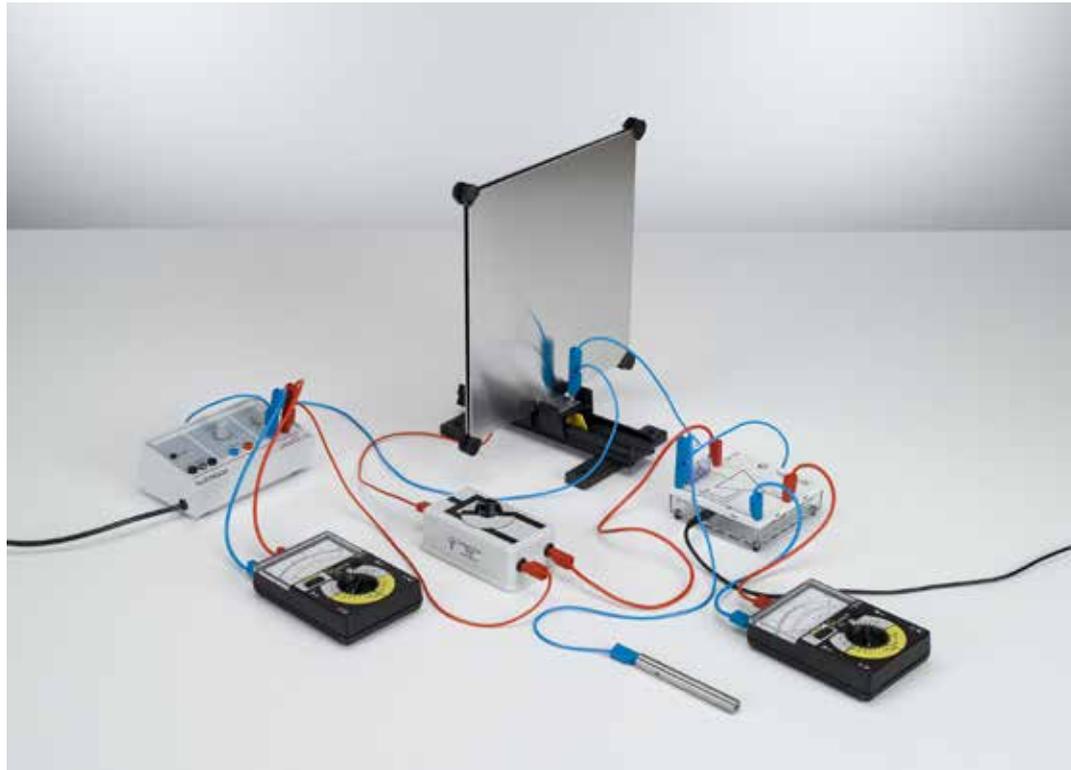
CONDENSATEUR À PLAQUES

P3.1.7.1

Détermination de la capacité d'un condensateur à plaques - mesure de la charge avec l'amplificateur électromètre

P3.1.7.2

Montage en parallèle et en série de condensateurs - mesure de la charge avec l'amplificateur électromètre



Détermination de la capacité d'un condensateur à plaques - mesure de la charge avec l'amplificateur électromètre (P3.1.7.1)

N° de cat.	Désignation	P3.1.7.1	P3.1.7.2
544 23	Condensateur démontable	1	1
522 27	Alimentation 450 V	1	1
504 48	Interrupteur va-et-vient	1	1
531 120	Multimètre LDanalog 20	2	2
532 14	Amplificateur électromètre	1	1
578 10	Condensateur 10 nF, STE 2/19	1	1
578 31	Condensateur 0,1 µF, STE 2/19	1	1
532 16	Tige de raccordement	1	1
501 45	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, rouge/bleu, paire	4	5
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1	1

Le condensateur à plaques est le type de condensateur le plus simple. Sa capacité dépend de la surface des plaques A et de la distance d . Elle augmente lorsque l'on place entre les deux plaques un isolant de constante diélectrique ϵ_r . On a

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

$$\text{avec } \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \text{ (constante de champ Électrique)}$$

Cette relation est étudiée dans l'expérience P3.1.7.1 avec un condensateur démontable à géométrie variable. On dispose de plaques de condensateur de surface $A=40 \text{ cm}^2$ et $A=80 \text{ cm}^2$ et de diélectriques en forme de plaque. La distance qui les sépare peut être changée de millimètre en millimètre.

L'expérience P3.1.7.2 consiste à déterminer la capacité totale C du condensateur démontable, alors que les deux paires de plaques sont branchées en parallèle puis en série, avec une distance entre les plaques constante. On compare ensuite cette capacité C avec les capacités simples C_1 et C_2 des deux paires de plaques. Pour le montage en parallèle, l'exploitation confirme la relation

$$C = C_1 + C_2$$

et pour le montage en série

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

CONDENSATEUR À PLAQUES

P3.1.7.3

Détermination de la capacité d'un condensateur à plaques - mesure de la charge avec l'amplificateur de mesure D



Détermination de la capacité d'un condensateur à plaques - mesure de la charge avec l'amplificateur de mesure D (P3.1.7.3)

N° de cat.	Désignation	P3.1.7.3
544 22	Condensateur à plaques	1
522 27	Alimentation 450 V	1
504 48	Interrupteur va-et-vient	1
532 00	Amplificateur de mesure D	1
531 120	Multimètre LDanalog 20	2
501 45	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, rouge/bleu, paire	3
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1

Lors de la détermination de la capacité d'un condensateur à plaques d'après

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

A: surface de la plaque

d: distance entre les plaques

avec $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$ (constante de champ Électrique)

on néglige le fait qu'une partie du champ électrique dépasse du bord du condensateur à plaques et donc qu'une plus grande charge est stockée entre les plaques pour une différence de potentiel donnée. Pour un condensateur à plaques dont une seule borne est reliée à la terre, avec comme surface de plaque

$$A = \pi \cdot r^2$$

la capacité est donnée par la relation

$$C = \epsilon_0 \left(\frac{\pi \cdot r^2}{d} + 3,7724 \cdot r + r \cdot \ln\left(\frac{\pi r}{d}\right) + \dots \right)$$

L'expérience P3.1.7.3 consiste à mesurer avec précision la capacité C d'un condensateur à plaques en fonction de la distance d entre les plaques. Pour ce faire, on emploie un condensateur à plaques de 13 cm de rayon dont l'écartement des plaques peut se régler de 0 à 70 mm. Le but de l'exploitation est de représenter les valeurs mesurées sous la forme

$$C = f\left(\frac{1}{d}\right)$$

et de les comparer avec les valeurs théoriques.

CONDENSATEUR À PLAQUES

P3.1.7.4

Mesure de l'intensité du champ dans un condensateur à plaques

P3.1.7.5

Mesure de la force du champ électrique dans un condensateur à plaques en fonction de diélectriques

P3.1.7.6

Mesure de la force du champ électrique d'une sphère chargée devant une plaque conductrice (charge imaginaire)



Mesure de l'intensité du champ dans un condensateur à plaques (P3.1.7.4)

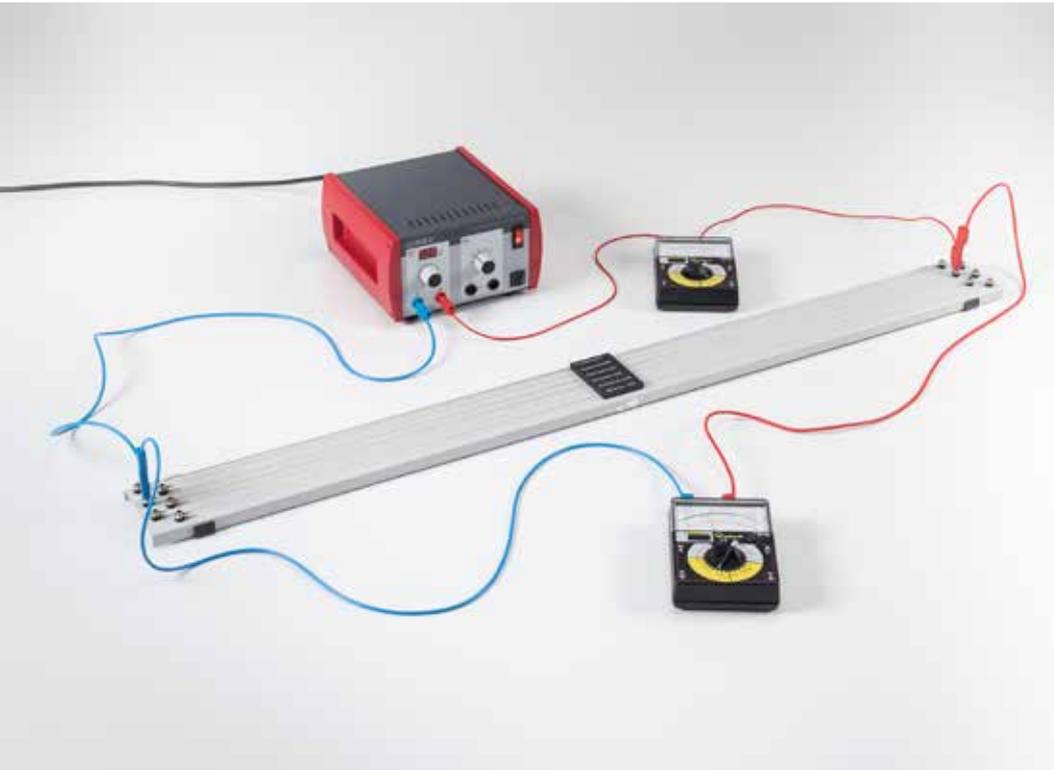
N° de cat.	Désignation	P3.1.7.4	P3.1.7.5	P3.1.7.6
524 080	Mesure de champ électrique S	1	1	1
540 540	Accessoires pour le mesureur de champ électrique S	1	1	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1	1	1
521 70	Alimentation haute tension 10 kV	1		1
460 317	Banc d'optique, profil S1, 0,5 m	1	1	
460 312	Cavalier avec noix 45/35	2	2	
500 600	Câble d'expérimentation de sécurité, 10 cm, jaune/vert	1		1
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	1		1
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1		1
531 120	Multimètre LDanalog 20		1	
522 27	Alimentation 450 V		1	
504 45	Interrupteur unipolaire		1	
500 421	Câble de connexion 19 A, 50 cm, rouge		3	
500 422	Câble de connexion 19 A, 50 cm, bleu		1	
500 442	Câble de connexion 19 A, 100 cm, bleu		1	
543 021	Sphère sur support isolant			1
311 02	Règle métallique, 1 m			1
300 11	Socle			2
500 95	Douilles d'adaptation de sécurité, rouges (6)			1

Ici, E dépend de la surface des plaques A et de la permittivité ϵ_r du matériau entre les plaques du condensateur.

L'expérience P3.1.7.4 se consacre à la détermination de la dépendance du potentiel du champ électrique E de la tension donnée U et de la distance entre les plaques d . Ainsi, on commence par mesurer le potentiel du champ électrique différent en changeant la tension U mais à une distance fixe d . Ensuite on maintient la tension U et l'on détermine le potentiel du champ électrique E en fonction de la distance entre les plaques d .

Dans l'expérience P3.1.7.5 on détermine l'influence de la constante diélectrique ϵ_r au potentiel du champ électrique. On place un corps diélectrique (verre, plastique) entre les plaques et mesure le potentiel du champ électrique. Ensuite, le condensateur à plaques chargé est séparé de la source d'alimentation et puis on enlève le corps diélectrique. Ainsi, on détermine le potentiel du champ électrique.

L'expérience P3.1.7.6 consiste à déterminer le potentiel du champ électrique sur la superficie d'une plaque conductrice qui se trouve à une distance r à une sphère chargée. Le cours dans le champ devant la plaque correspond au cas où il y ait à la place de la plaque à double distance une sphère de charge opposée (charge miroir). Le résultat en est un doublage du potentiel du champ en comparaison à une sphère librement posée.



LOI D'OHM

P3.2.2.1

Vérification de la loi d'Ohm et mesure de résistances spécifiques

P3.2.2.2

Vérification de la loi d'Ohm - Mesure avec CASSY

Vérification de la loi d'Ohm et mesure de résistances spécifiques (P3.2.2.1)

N° de cat.	Désignation	P3.2.2.1	P3.2.2.2
550 57	Appareil pour mesures de la résistance	1	
521 487	Alimentation CA/CC PRO 0...12 V/3 A	1	
531 120	Multimètre LDanalog 20	2	
501 25	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, rouge	2	
501 30	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, rouge	1	
501 31	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, bleu	2	
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité , 20/10		2
501 48	Cavalier STE 2/19, jeu de 10		1
567 18	Plaquette pour enroulement de fil		1
550 46	Fil résistif (nickel-chrome), 0,25 mm Ø, 100 m		1
579 331	Support enfichable STE		2
579 13	Interrupteur à bascule STE 2/19		1
577 32	Résistance 100 Ohms, STE 2/19		1
521 231	Transformateur variable TBT 3/6/9/12 V		1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN		1
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge		2
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu		2
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir		1

La relation suivante (loi d'Ohm) est une très bonne approximation dans des circuits électriques constitués de conducteurs métalliques

$$U = R \cdot I$$

c.-à-d. que la chute de tension U à un conducteur est proportionnelle au courant I qui traverse le conducteur. La constante de proportionnalité R est appelée résistance du conducteur. On a

$$R = \rho \cdot \frac{s}{A}$$

ρ : résistance spécifique du matériau conducteur

s : longueur du fil

A : section du fil

L'expérience P3.2.2.1 consiste à vérifier la proportionnalité entre le courant et la tension pour des fils métalliques de matériau différent, ainsi que d'épaisseur et de longueur différentes et à déterminer la résistance spécifique du matériau utilisé.

L'expérience P3.2.2.2 consiste à vérifier la proportionnalité entre le courant et la tension sur un fil métallique. La mesure est effectuée avec le système CASSY.

LOIS DE KIRCHHOFF

P3.2.3.1

Mesure du courant et de la tension sur des résistances branchées en parallèle et en série



Mesure du courant et de la tension sur des résistances branchées en parallèle et en série (P3.2.3.1)

N° de cat.	Désignation	P3.2.3.1
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité , 20/10	1
577 36	Résistance 220 ohms, STE 2/19	1
577 38	Résistance 330 ohms, STE 2/19	1
577 40	Résistance 470 Ohms, STE 2/19	1
577 44	Résistance 1 kOhm, STE 2/19	1
577 53	Résistance 5,6 kohms, STE 2/19	1
577 56	Résistance 10 kohms, STE 2/19	1
577 68	Résistance 100 kohms, STE 2/19	1
501 48	Cavalier STE 2/19, jeu de 10	1
521 487	Alimentation CA/CC PRO 0...12 V/3 A	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	2
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	2
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir	1

Les lois de Kirchhoff sont d'une importance fondamentale pour le calcul des courants et tensions partiels dans des circuits électriques ramifiés. La loi des noeuds dit que la somme des courants qui arrivent à un noeud est égale à la somme des courants qui partent de ce noeud. Selon la loi des mailles, la somme des tensions dans une boucle fermée, ayant un sens choisi de manière arbitraire, est nulle. L'application des lois de Kirchhoff consiste en la mise en place d'un système d'équations linéaires dont les solutions sont les courants et tensions partiels inconnus.

Pour la mesure de résistances, on a dans la pratique presque exclusivement recours au montage en pont déterminé en 1843 par *Ch. Wheatstone*:

L'expérience P3.2.3.1 consiste à vérifier si les lois de Kirchhoff sont valables dans des circuits électriques avec des résistances branchées en parallèle et en série. On montre que deux résistances R_1 et R_2 branchées en série ont la résistance équivalente

$$R = R_1 + R_2$$

En parallèle, la résistance équivalente R est égale à

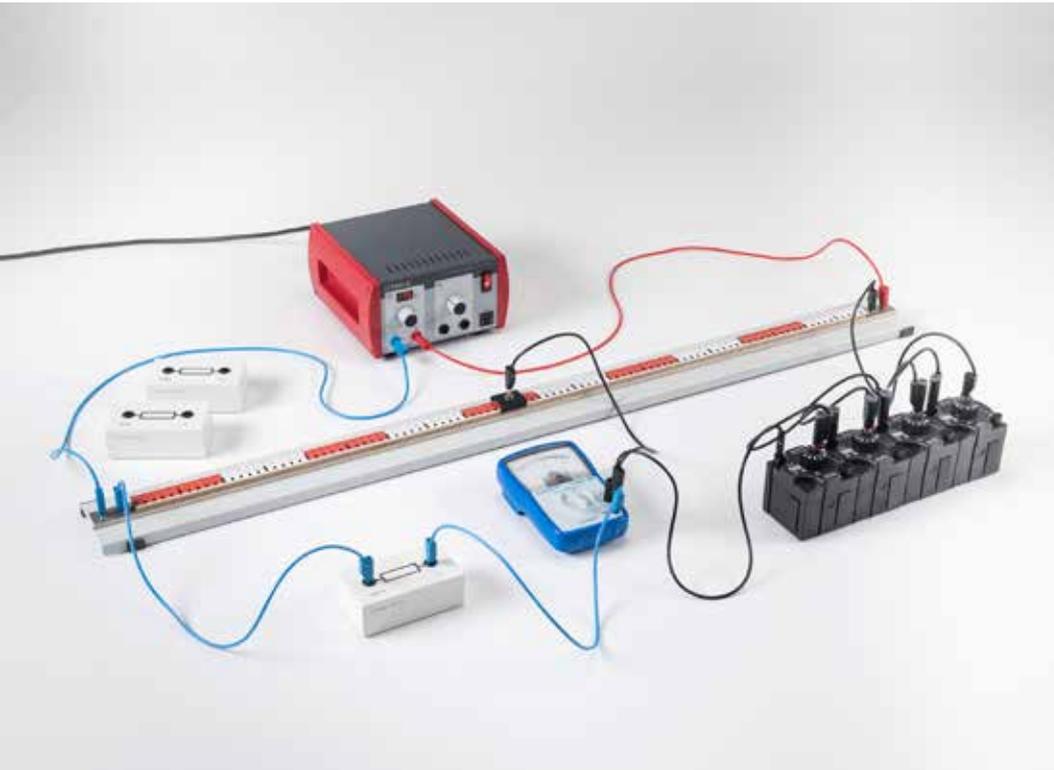
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$



Mesure du courant et de la tension dans une connexion en série (P3.2.3.1)

LOIS DE KIRCHHOFF

P3.2.3.4
Détermination de résistances avec un pont de Wheatstone



Détermination de résistances avec un pont de Wheatstone (P3.2.3.4)

N° de cat.	Désignation	P3.2.3.4
536 02	Pont de Wheatstone	1
536 121	Résistance de mesure 10 Ω	1
536 131	Résistance de mesure 100 Ω	1
536 141	Résistance de mesure 1 kΩ	1
536 776	Décade de résistances 0...1 kΩ	1
536 777	Décade de résistances 0...100 Ω	1
536 778	Décade de résistances 0...10 Ω	1
536 779	Décade de résistances 0...1 Ω	1
521 487	Alimentation CA/CC PRO 0...12 V/3 A	1
501 26	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, bleu	2
501 28	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, noir	3
501 30	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, rouge	1
501 31	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, bleu	1

Pour la mesure de résistances, on a dans la pratique presque exclusivement recours au montage en pont déterminé en 1843 par *Ch. Wheatstone*:

Dans l'expérience P3.2.3.4, une tension U est appliquée à un fil de mesure de section constante et de 1 m de long. Les extrémités du fils sont reliées à une résistance inconnue R_x et à une résistance variable R placée derrière, parfaitement connue. Un contact de frottement sépare le fil d'essai en deux segments de longueur s_1 et s_2 . Ce contact de frottement est relié au noeud entre R_x et R via un ampèremètre utilisé comme instrument à zéro. Si le courant est ajusté sur zéro, on a

$$R_x = \frac{s_1}{s_2} \cdot R$$

Pour ce type de montage expérimental, la précision maximale est atteinte lorsque le montage est symétrique, c.-à-d. que le contact de frottement doit être mis en position médiane sur le fil d'essai, de sorte que les deux segments s_1 et s_2 aient la même longueur.

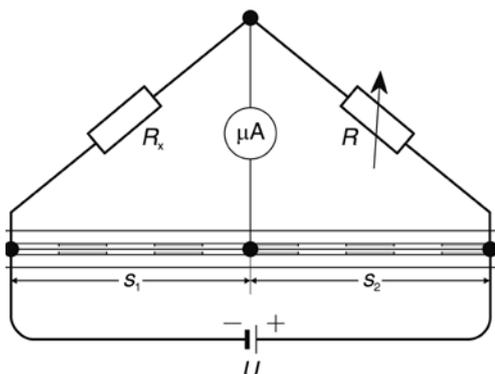


Schéma des connexions pour le pont de Wheatstone (P3.2.3.4)

CIRCUIT D'INSTRUMENTS DE MESURE ÉLECTRIQUES

P3.2.4.1
L'ampèremètre comme résistance ohmique dans un circuit électrique

P3.2.4.2
Le voltmètre comme résistance ohmique dans un circuit électrique



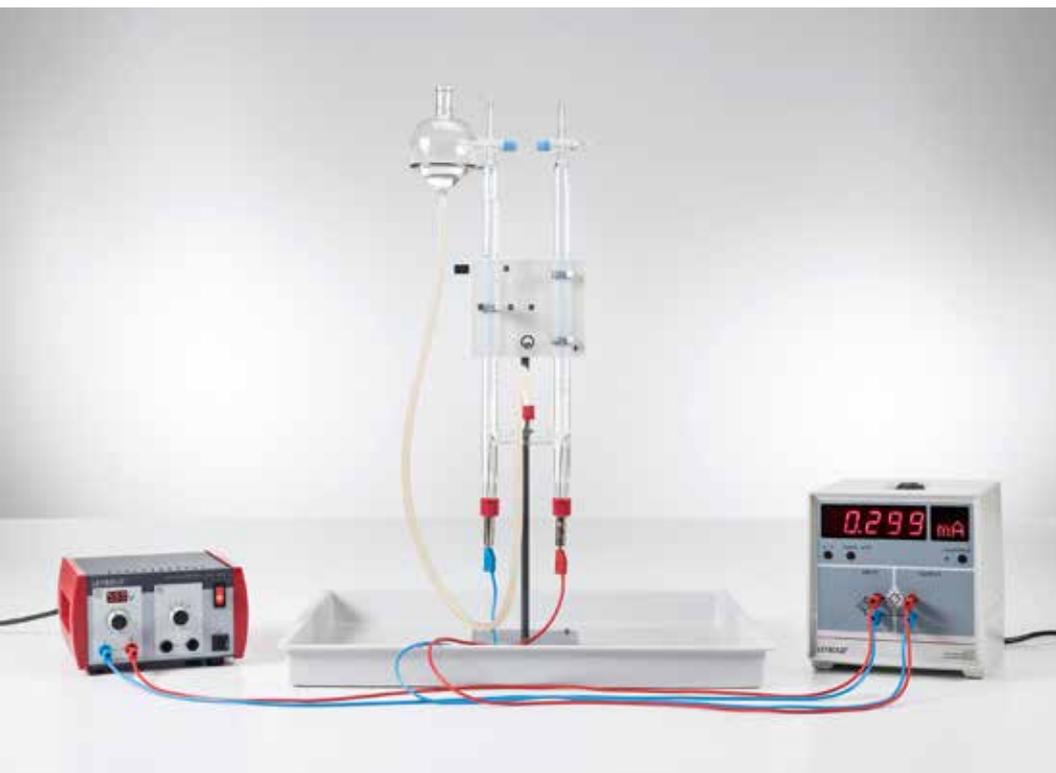
L'ampèremètre comme résistance ohmique dans un circuit électrique (P3.2.4.1)

N° de cat.	Désignation	P3.2.4.1	P3.2.4.2
521 487	Alimentation CA/CC PRO 0...12 V/3 A	1	1
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité , 20/10	1	1
577 33	Résistance 82 Ω , STE 2/19	3	
577 52	Résistance 4,7 k Ω , STE 2/19	1	1
531 110	Multimètre LDanalog 10	2	2
501 48	Cavalier STE 2/19, jeu de 10	1	
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	3	3
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	3	3
577 75	Résistance 680 kohms, STE 2/19		1
577 71	Résistance 220 kohms, STE 2/19		1

Le fait que la résistance interne d'un instrument de mesure électrique influe sur la mesure du courant et de la tension est une conséquence importante des lois de Kirchhoff. Ainsi, la résistance totale d'un circuit électrique est augmentée par la résistance interne de l'ampèremètre; si celle-ci ne peut être négligée, l'ampèremètre mesurera un courant trop faible. Un voltmètre mesure une tension trop faible si sa résistance interne est négligeable par rapport à la résistance à laquelle la chute de tension doit être mesurée.

L'expérience P3.2.4.1 consiste à déterminer la résistance interne d'un ampèremètre, en relevant la chute de tension aux bornes de l'ampèremètre durant la mesure. On montre ensuite que le montage en parallèle d'une deuxième résistance correspondant à la résistance interne, divise la déviation de l'ampèremètre par deux, c.-à-d. que la plage de mesure est multipliée par deux.

L'expérience P3.2.4.2 consiste à déterminer la résistance interne d'un voltmètre en mesurant le courant qui le parcourt. Pour augmenter la plage de mesure, on branche ici une deuxième résistance correspondant à la résistance interne, en série avec le voltmètre.



CONDUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ PAR ÉLECTROLYSE

P3.2.5.1
Détermination de la constante de Faraday

Détermination de la constante de Faraday (P3.2.5.1)

N° de cat.	Désignation	P3.2.5.1
664 350	Électrolyseur en U	1
382 35	Thermomètre, -10...+50 °C/0,1 K	1
531 832	Multimètre numérique P	1
521 487	Alimentation CA/CC PRO 0...12 V/3 A	1
501 45	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, rouge/bleu, paire	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1
649 45	Plateau de rangement, 552 mm x 459 mm x 48 mm	1
674 7920	Acide sulfurique, dilué, env. 2 N (= 10 %), 500 ml	1

Lors de l'électrolyse, les processus de conduction électrique sont liés à un dépôt de substance. La quantité déposée est proportionnelle à la charge Q transportée qui a parcouru l'électrolyte. Cette charge peut se calculer à l'aide de la constante de Faraday F , une constante universelle liée à la charge élémentaire e par le Nombre d'Avogadro N_A

$$F = N_A \cdot e$$

Si l'on introduit le nombre de moles n pour la quantité déposée et si l'on considère la valence z des ions dégagés, on obtient la relation

$$Q = n \cdot F \cdot z$$

Dans l'expérience P3.2.5.1, on produit une certaine quantité d'hydrogène à l'aide d'un appareil d'électrolyse selon Hofmann, afin de déterminer la constante de Faraday. Pour la valence d'ions hydrogène on a $z = 1$. On calcule le nombre de moles n des atomes d'hydrogène dégagés à l'aide de la loi des gaz parfaits, à partir du volume V d'hydrogène moléculaire formé pour une pression extérieure p et une température ambiante T :

$$n = 2 \cdot \frac{pV}{RT}$$

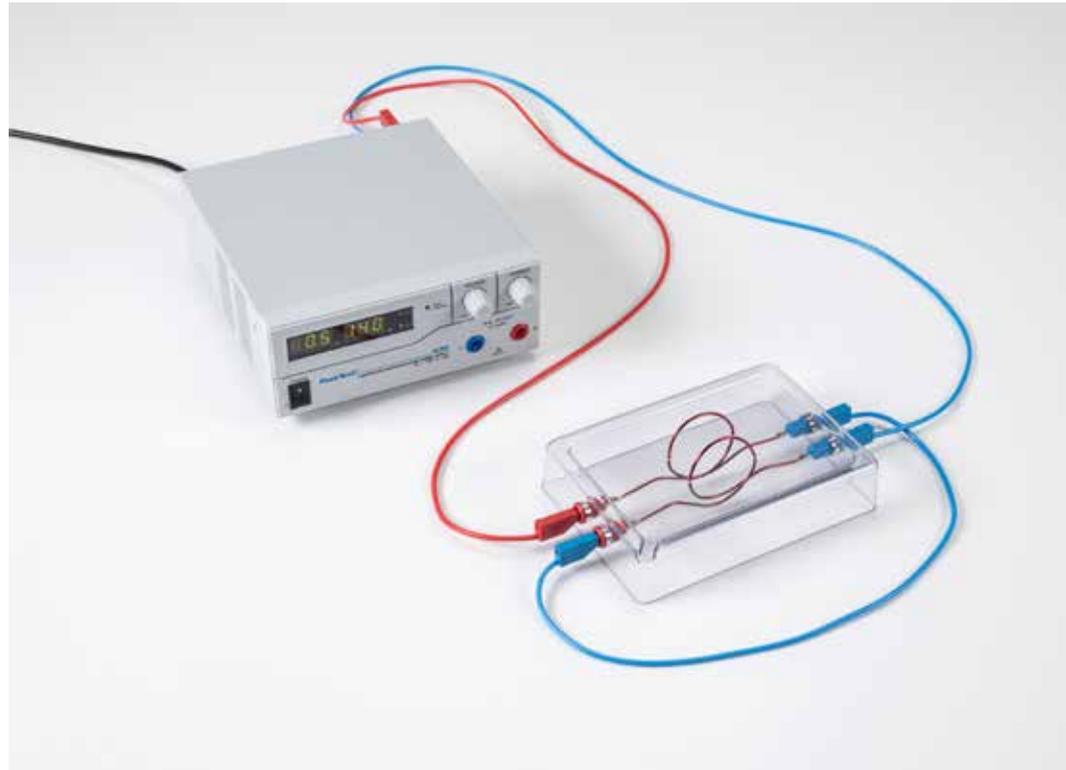
$$\text{avec } R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \text{ (constante des gaz universelle)}$$

On mesure simultanément le travail électrique W fourni pour l'électrolyse à tension constante U_0 . La quantité de charge recherchée est donc

$$Q = \frac{W}{U_0}$$

EXPÉRIENCES DE BASE EN MAGNÉTOSTATIQUE

P3.3.1.1 Représentation de lignes de champ magnétiques

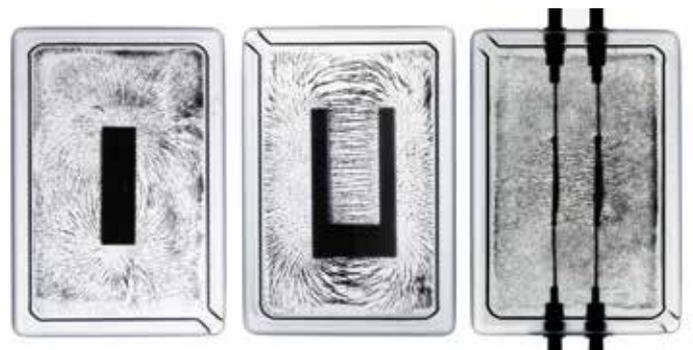


Représentation de lignes de champ magnétiques (P3.3.1.1)

N° de cat.	Désignation	P3.3.1.1
560 701	Jeu pour la démonstration du champ magnétique	1
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A	1
501 26	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, bleu	1
501 30	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, rouge	1
501 31	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, bleu	1
MIK 74708	BMS SyncCam 8 mégapixels	1*
	En complément : Ordinateur ou appareil d'affichage d'images	1

* complément recommandé

La magnétostatique consiste à étudier la répartition spatiale de champs magnétiques à proximité d'aimants permanents et de flux stationnaires, ainsi que l'effet dynamique du champ magnétique sur les aimants et les flux. Les expériences de base peuvent être effectuées avec des moyens expérimentaux simples. Pour représenter les champs magnétiques dans l'expérience P3.3.1.1, on saupoudre de la limaille de fer sur une surface plane, afin qu'elle s'oriente suivant les lignes de champ. Cette méthode permet de représenter le champ magnétique d'un conducteur rectiligne, d'une boucle conductrice et d'une bobine.



Afficher les lignes de flux magnétique (P3.3.1.1)

ACTIONS DES FORCES DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE

P3.3.3.1

Mesure de la force sur des conducteurs parcourus par un courant dans le champ magnétique d'un aimant en fer à cheval

P3.3.3.2

Mesure de la force sur des conducteurs parcourus par un courant dans un champ magnétique homogène - tracé avec CASSY



Mesure de la force sur des conducteurs parcourus par un courant dans le champ magnétique d'un aimant en fer à cheval (P3.3.3.1)

N° de cat.	Désignation	P3.3.3.1	P3.3.3.2
510 22	Aimant en fer à cheval, grand, avec joug	1	
314 265	Support de boucle conductrice	1	1
516 34	Boucles conductrices pour la mesure de la force	1	1
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A	1	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1	
524 060	Capteur de forces S, ±1 N	1	1
300 02	Pied en V, petit	1	1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø	1	1
301 01	Noix Leybold	1	1
501 30	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, rouge	1	2
501 31	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, bleu	1	2
562 11	Noyau en U avec joug		1
562 14	Bobine à 500 spires		2
562 25	Garniture de pièces polaires		1
524 013	Sensor-CASSY 2		1
524 220	CASSY Lab 2		1
524 0431	Adaptateur 30 A		1
531 183	Multimètre numérique 3340		1
521 487	Alimentation CA/CC PRO 0...12 V/3 A		1
501 26	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, bleu		3
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		1

Pour mesurer la force sur un conducteur dans un champ magnétique, on fixe des boucles conductrices à un capteur de force. Le capteur de force comprend deux lames souples parallèles avec quatre jauges extensométriques en montage en pont. En charge, leur résistance électrique varie proportionnellement à la force qui agit. Le capteur de force peut être relié à l'interface CASSY. Il est conseillé d'employer un adaptateur 30 A pour la mesure du courant.

Dans l'expérience P3.3.3.1, les boucles conductrices se trouvent dans le champ magnétique d'un aimant en fer à cheval. La force F est mesurée en fonction de l'intensité du courant I , de la longueur du conducteur s et de l'angle α entre le champ magnétique et le conducteur. La relation suivante est confirmée

$$F = I \cdot s \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Dans l'expérience P3.3.3.2, on produit un champ magnétique homogène avec un électroaimant à noyau en U et garniture de pièce polaire. On mesure la force F en fonction de l'intensité du courant I . Les résultats des mesures pour différentes longueurs de conducteurs s sont répertoriés et exploités dans un graphique récapitulatif.

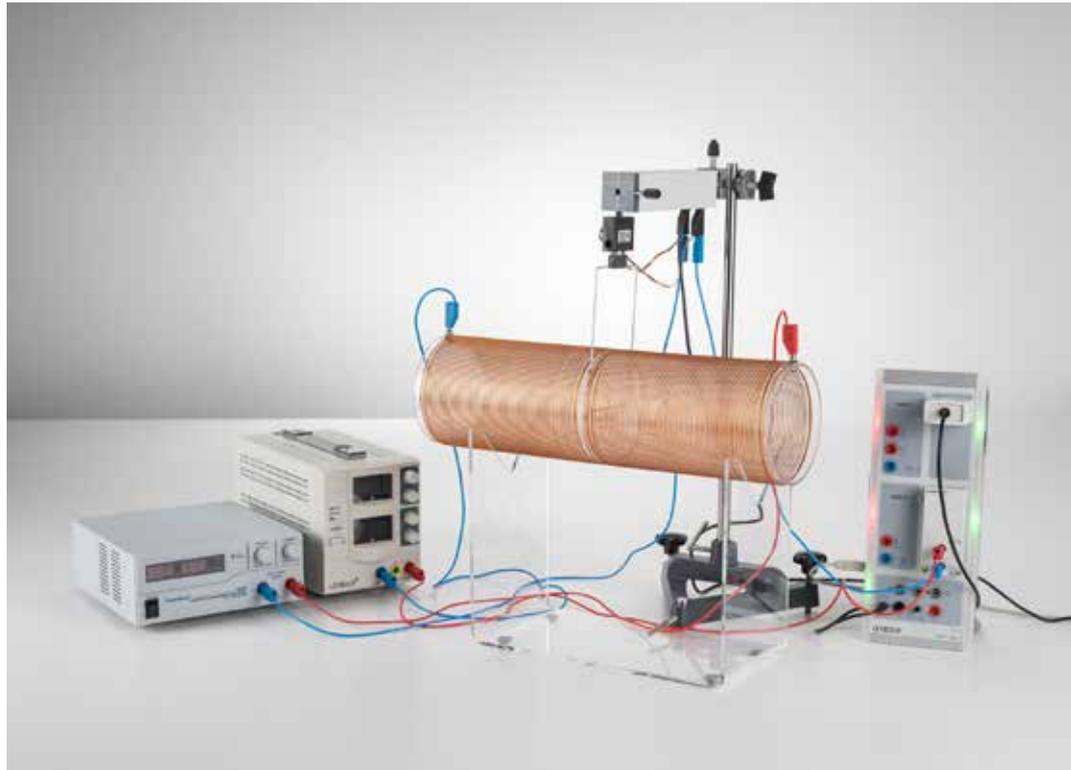
ACTIONS DES FORCES DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE

P3.3.3.3

Mesure de la force sur un conducteur parcouru par un courant dans le champ magnétique d'une bobine sans fer - tracé avec CASSY

P3.3.3.4

Mesures fondamentales pour la définition électrodynamique de l'ampère



Mesure de la force sur un conducteur parcouru par un courant dans le champ magnétique d'une bobine sans fer - tracé avec CASSY (P3.3.3.3)

N° de cat.	Désignation	P3.3.3.3	P3.3.3.4
314 265	Support de boucle conductrice	1	1
516 34	Boucles conductrices pour la mesure de la force	1	
516 244	Bobine de champ, d = 120 mm	1	
516 249	Support pour tubes et bobines	1	
524 013	Sensor-CASSY 2	1	
524 220	CASSY Lab 2	1	
524 0431	Adaptateur 30 A	1	
524 060	Capteur de forces S, ±1 N	1	1
521 546	Alimentation CC 0...16 V/0...5 A	1	
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A	1	1
300 02	Pied en V, petit	1	1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø	1	1
301 01	Noix Leybold	1	1
501 26	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, bleu	1	1
501 30	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, rouge	2	1
501 31	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, bleu	2	1
516 33	Boucles conductrices pour la définition de l'ampère		1
516 31	Support à hauteur variable		1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WiFi		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	

Pour mesurer la force sur un conducteur dans un champ magnétique, on fixe des boucles conductrices à un capteur de force. Le capteur de force comprend deux lames souples parallèles avec quatre jauges extensométriques en montage en pont. En charge, leur résistance électrique varie proportionnellement à la force qui agit. Le capteur de force peut être relié à l'interface CASSY. Il est conseillé d'employer un adaptateur 30 A pour la mesure du courant.

On utilise une bobine sans fer dans l'expérience P3.3.3.3 pour produire le champ magnétique. Le champ magnétique est calculé à partir des paramètres de la bobine et on le compare avec la valeur obtenue à partir de la mesure de la force.

Le but de l'expérience P3.3.3.4 est la définition électrodynamique de l'ampère. On définit l'intensité du courant en déterminant la force entre deux conducteurs parallèles de longueur infinie, parcourus par le même courant. Si r est la distance entre les conducteurs, on a la force F par unité de longueur s du conducteur

$$\frac{F}{s} = \mu_0 \cdot \frac{I_1 I_2}{2\pi \cdot r}$$

Dans l'expérience, on utilise deux conducteurs de 30 cm environ, distants de quelques millimètres. On mesure la force F pour différentes intensités I et distances r .

LOI DE BIOT-SAVART

P3.3.4.1

Mesure du champ magnétique sur un conducteur droit et sur des boucles conductrices

P3.3.4.2

Mesure du champ magnétique sur une bobine sans fer

P3.3.4.4

Mesure du champ magnétique sur un conducteur droit et sur des boucles conductrices à des courants faibles

P3.3.4.5

Mesure du champ magnétique sur une bobine sans fer à des courants faibles



Mesure du champ magnétique sur un conducteur droit et sur des boucles conductrices (P3.3.4.1)

N° de cat.	Désignation	P3.3.4.1	P3.3.4.2	P3.3.4.4	P3.3.4.5
516 235	Conducteurs de courant, jeu de 4	1		1	
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1	1	1	1
524 0381	Sonde B combinée S	1			
501 11	Câble rallonge, à 15 pôles	1	1	1	1
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A	1	1		
460 21	Support pour éléments enfichables	1		1	
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	1		1	
460 311	Cavalier avec noix 45/65	1		1	
460 312	Cavalier avec noix 45/35	1		1	
501 644	Douilles de raccordement, noires, jeu de 6	1		1	
501 30	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, rouge	1	1	1	1
501 31	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, bleu	1	1	1	1
516 242	Bobine à densité de spires variable		1		1
516 249	Support pour tubes et bobines		1		1
524 0382	Sonde B axiale S, ±1000 mT		1		
300 11	Socle		1		
524 0383	Sonde B axiale S, ±0,3 mT			1	1
521 546	Alimentation CC 0...16 V/0...5 A			1	1
301 01	Noix Leybold			1	
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø			1	

En principe, on peut calculer le champ magnétique de n'importe quel conducteur parcouru par un courant en appliquant la loi de Biot et Savart. Toutefois on ne peut donner des solutions analytiques que pour des conducteurs à symétries précises, par exemple pour un fil de longueur infinie, pour une boucle conductrice annulaire, ou pour une bobine cylindrique. On peut aisément vérifier la loi de Biot et Savart sur de tels conducteurs.

Dans l'expérience P3.3.4.1 et P3.3.4.4, on mesure le champ magnétique d'un conducteur droit et long pour différentes intensités I du courant, en fonction de la distance r au conducteur. Quantitativement, on confirme la relation

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{r}$$

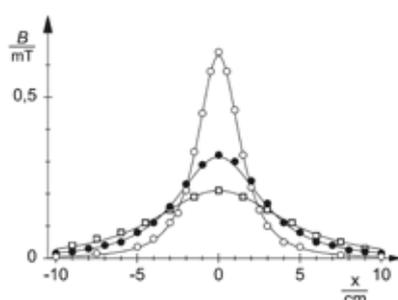
En complément, on mesure le champ magnétique de bobines circulaires de rayon R différent en fonction de la distance x sur l'axe central de la bobine. On compare les valeurs mesurées avec celles calculées à partir de la formule

$$B = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{I \cdot R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

Les mesures peuvent être effectuées avec la sonde combinée B. Celle-ci est constituée de deux sondes à effet Hall, l'une étant sensible parallèlement à l'axe de la sonde et l'autre perpendiculairement à l'axe de la sonde.

Dans l'expérience P3.3.4.2 et P3.3.4.5, on étudie le champ magnétique d'une bobine sans fer dont la longueur L peut être variée pour un nombre de spires N constant. Pour le champ magnétique on a

$$B = \mu_0 \cdot I \cdot \frac{N}{L}$$



Le champ magnétique B de boucles conductrices circulaires de rayon R en fonction de la coordonnée spatiale x (P3.3.4.1).

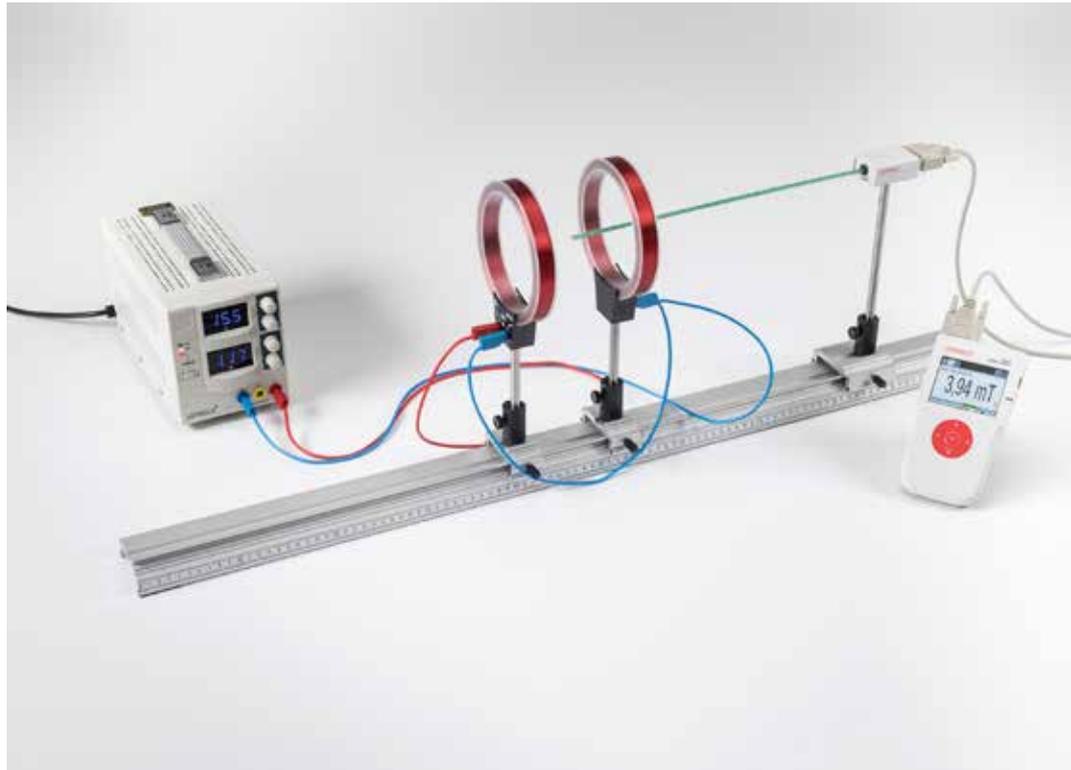
LOI DE BIOT-SAVART

P3.3.4.3

Mesure du champ magnétique sur une paire de bobines dans un dispositif de Helmholtz

P3.3.4.6

Mesure du champ magnétique sur une paire de bobines dans un dispositif de Helmholtz à des courants faibles



Mesure du champ magnétique sur une paire de bobines dans un dispositif de Helmholtz (P3.3.4.3)

N° de cat.	Désignation	P3.3.4.3	P3.3.4.6
555 604	Paire de bobines de Helmholtz	1	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1	1
524 0382	Sonde B axiale S, ± 1000 mT	1	
501 11	Câble rallonge, à 15 pôles	1	1
521 546	Alimentation CC 0...16 V/0...5 A	1	1
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	1	1
460 311	Cavalier avec noix 45/65	1	1
460 312	Cavalier avec noix 45/35	2	2
501 26	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, bleu	1	1
501 30	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, rouge	1	1
501 31	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, bleu	1	2
524 0383	Sonde B axiale S, $\pm 0,3$ mT		1

En principe, on peut calculer le champ magnétique de n'importe quel conducteur parcouru par un courant en appliquant la loi de Biot et Savart. Toutefois on ne peut donner des solutions analytiques que pour des conducteurs à symétries précises, par exemple pour un fil de longueur infinie, pour une boucle conductrice annulaire, ou pour une bobine cylindrique. On peut aisément vérifier la loi de Biot et Savart sur de tels conducteurs.

Dans l'expérience P3.3.4.3 et P3.3.4.6, on étudie l'homogénéité d'un champ magnétique dans une paire de bobines de Helmholtz. Pour ce faire, on enregistre le champ magnétique le long de l'axe central de la bobine pour plusieurs séries de mesure, la distance a entre les bobines variant d'une série à l'autre. Si a correspond au rayon de la bobine, le champ magnétique est largement indépendant de la position x sur l'axe de la bobine.

CHOC DE TENSION

P3.4.1.1

Génération d'un choc de tension dans une boucle conductrice avec un aimant permanent en mouvement



Génération d'un choc de tension dans une boucle conductrice avec un aimant permanent en mouvement (P3.4.1.1)

N° de cat.	Désignation	P3.4.1.1
510 12	Barreaux cylindriques aimantés, paire	1
562 13	Bobine à 250 spires	1
562 14	Bobine à 500 spires	1
562 15	Bobine à 1000 spires	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 220	CASSY Lab 2	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

Chaque variation du flux magnétique Φ dans une boucle conductrice induit une tension U dont l'intensité est proportionnelle à la variation du flux. Une telle variation du flux est provoquée par exemple lorsqu'un aimant permanent est déplacé dans une boucle conductrice fixe. Dans ce cas, il est d'usage de considérer la tension en fonction du temps

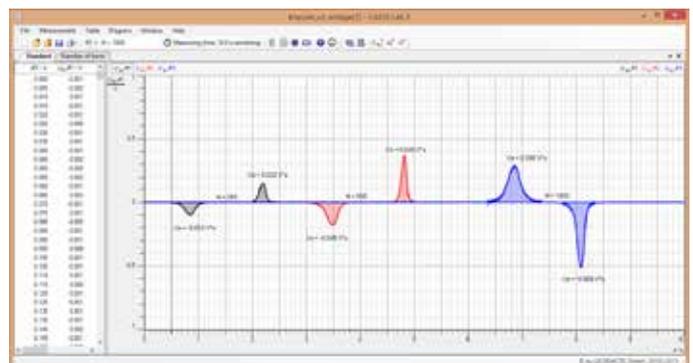
$$U = - \frac{d\Phi}{dt}$$

et le saut de tension

$$\int_{t_1}^{t_2} U(t) dt = \Phi(t_1) - \Phi(t_2)$$

Il correspond à la différence des flux magnétiques avant et après la variation.

L'expérience P3.4.1.1 consiste à produire un saut de tension en plaçant manuellement un barreau magnétique dans une bobine sans fer, ou en le retirant de la bobine. On mesure la tension U en fonction du temps et on évalue la surface sous le signal. La surface ne dépend pas de la vitesse à laquelle le barreau est déplacé; elle est toujours égale au flux Φ de l'aimant permanent à l'intérieur de la bobine sans fer. Si les bobines ont la même surface, la surface sous le signal est proportionnelle au nombre de spires.



Tensions induites d'un aimant en mouvement (P3.4.1.1).

INDUCTION DANS UNE BOUCLE CONDUCTRICE EN MOUVEMENT

P3.4.2.1

Mesure d'une force électromotrice induite dans une boucle conductrice déplacée à travers un champ magnétique



Mesure d'une force électromotrice induite dans une boucle conductrice déplacée à travers un champ magnétique (P3.4.2.1)

N° de cat.	Désignation	P3.4.2.1
516 40	Appareil à induction avec boucles conductrices	1
510 48	Aimants, 35 mm Ø, paire	6
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1
524 0401	Capteur de $\mu V S$	1
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	1
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1

Si l'on retire une boucle conductrice de largeur b constante d'un champ magnétique B homogène, avec la vitesse

$$v = \frac{dx}{dt}$$

la variation du flux magnétique pour le temps dt vaut

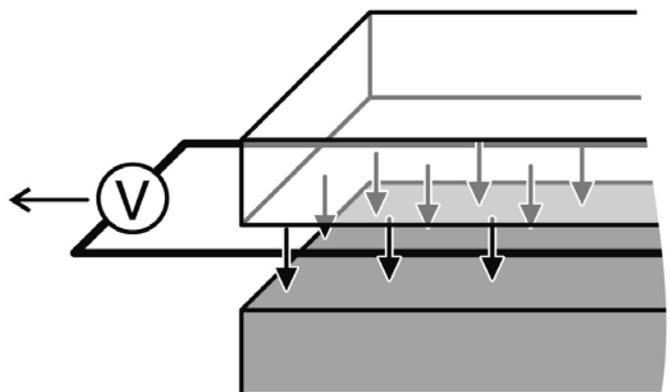
$$d\Phi = -B \cdot b \cdot dx$$

La variation du flux induit la tension suivante dans la boucle conductrice:

$$U = B \cdot b \cdot v$$

Dans l'expérience P3.4.2.1, un mobile est déplacé entre les pièces polaires d'un aimant comportant des boucles d'induction de largeur différente. On mesure la force électromotrice induite U en fonction de la densité de flux magnétique B , de la largeur b et de la vitesse v des boucles d'induction. Le but de l'exploitation est de confirmer les proportionnalités

$$U \propto B, U \propto b, U \propto v$$

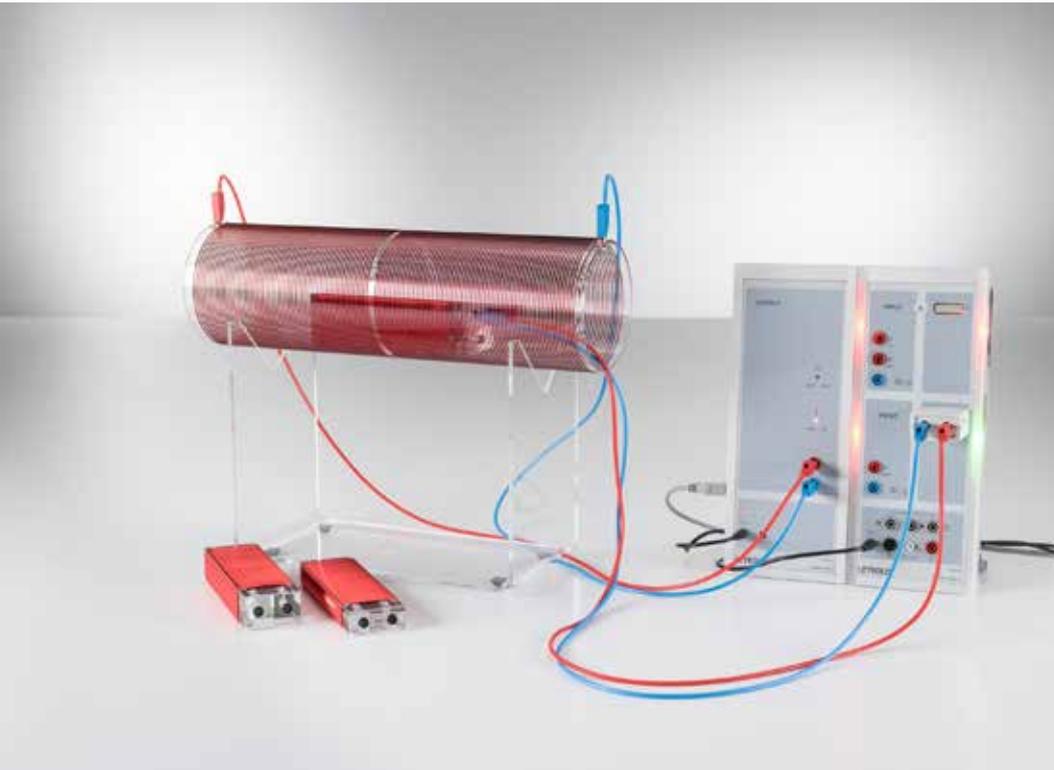


Tension d'induction dans une boucle à conducteur mobile (P3.4.2.1).

INDUCTION PAR VARIATION DU CHAMP MAGNÉTIQUE

P3.4.3.2

Mesure de la force électromotrice induite dans une boucle conductrice pour un champ magnétique variable - avec Power-CASSY comme source de courant variable



Mesure de la force électromotrice induite dans une boucle conductrice pour un champ magnétique variable - avec Power-CASSY comme source de courant variable (P3.4.3.2)

N° de cat.	Désignation	P3.4.3.2
516 249	Support pour tubes et bobines	1
516 244	Bobine de champ, d = 120 mm	1
516 241	Bobines à induction, jeu de 3	1
524 011USB	Power-CASSY USB	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 220	CASSY Lab 2	1
524 0401	Capteur de $\mu\text{V S}$	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	2
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

Une variation temporelle du champ magnétique B homogène à l'intérieur d'une bobine avec un nombre N_1 de spires et de surface A_1 , induit la tension suivante dans une bobine

$$U = N_1 \cdot A_1 \cdot \frac{dB}{dt}$$

L'expérience P3.4.3.2 consiste à placer des bobines d'induction de surface et de nombre de spires différents dans une bobine de champ cylindrique, traversée par des courants alternatifs de fréquence, d'amplitude et de forme du signal différents. Si $I(t)$ est l'intensité en fonction du temps, N_2 le nombre de spires et L_2 la longueur totale de la bobine, les courants produisent le champ magnétique suivant dans la bobine de champ

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N_2}{L_2} \cdot I$$

avec $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$ (constante de champ magnétique)

L'évolution dans le temps $U(t)$ des tensions induites dans les bobines d'induction est enregistrée avec le système CASSY. On étudie l'influence de la surface et du nombre de spires des bobines d'induction et l'influence de la fréquence, de l'amplitude et de la forme du signal du courant d'excitation.

TRANSFORMATEUR

P3.4.5.1

Transformation de tensions et de courants avec un transformateur

P3.4.5.2

Transformation de tensions avec un transformateur chargé

P3.4.5.3

Tracé de la tension et du courant en fonction du temps pour un transformateur chargé



Transformation de tensions et de courants avec un transformateur (P3.4.5.1)

N° de cat.	Désignation	P3.4.5.1	P3.4.5.2	P3.4.5.3
562 801	Transformateur pour travaux pratiques	1	1	1
531 120	Multimètre LDanalog 20	2	2	
521 391	Alimentation CA/CC 0...24 V/5 A	1	1	
500 444	Câble de connexion 19 A, 100 cm, noir	6	7	6
537 34	Rhéostat à curseur 100 ohms		1	1
459 23	Ecran en verre acrylique sur tige		1	
514 72	Diffuseur de limaille de fer		1	
514 73	Poudre de fer, 250 g		1	
524 013	Sensor-CASSY 2			1
524 011USB	Power-CASSY USB			1
524 220	CASSY Lab 2			1
500 414	Câble de connexion 19 A, 25 cm, noir			1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)			1

La transformation de tension d'un transformateur à vide est donnée par la relation des nombres de spires, indépendamment du type du transformateur :

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (\text{si } I_2 = 0)$$

La transformation du courant en fonctionnement en court-circuit est inversement proportionnelle à la relation du nombre de spires.

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (\text{si } U_2 = 0)$$

Le comportement en charge dépend en revanche du type spécifique du condensateur. Ceci peut se vérifier avec le transformateur pour travaux pratiques.

Le transformateur démontable à bobines multiples est proposé en alternative au transformateur pour travaux pratiques. Ces bobines peuvent être déplacées aisément sur les branches du noyau en U et peuvent ainsi être échangées facilement. Les expériences décrites pour le transformateur pour travaux pratiques (voir P3.4.5.1-3) sont évidemment applicables au transformateur démontable mais de nouvelles expériences peuvent aussi être proposées.

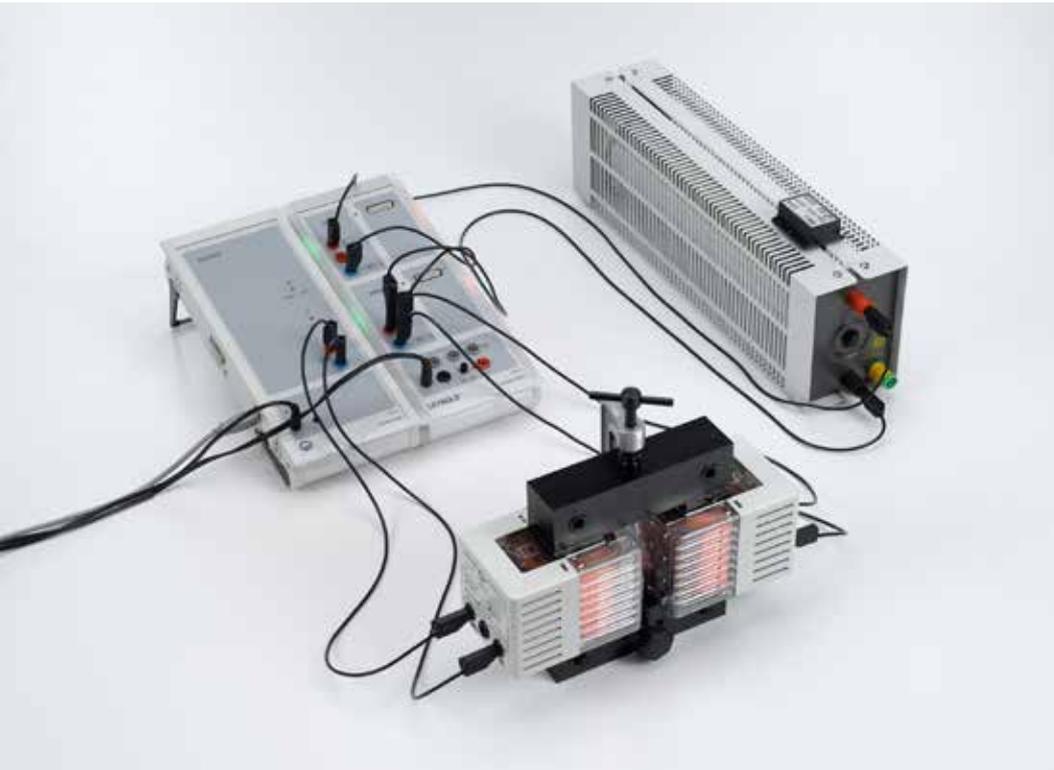
L'objet de l'expérience P3.4.5.1 est de mesurer la conversion de la tension d'un transformateur à vide et la conversion du courant d'un transformateur en court-circuit. On montre simultanément la différence entre un transformateur d'isolement et un autotransformateur.

Dans l'expérience P3.4.5.2, on étudie la relation entre tension primaire et tension secondaire du transformateur «dur» et du transformateur «mou». Dans les deux cas, les lignes de champ magnétiques du transformateur sont mises en évidence par de la limaille de fer sur une plaque de verre placée sur le transformateur.

L'expérience P3.4.5.3 consiste à représenter la tension primaire et la tension secondaire de même que le courant primaire et le courant secondaire d'un transformateur en charge. Ces tensions et courants sont représentés en tant que grandeurs subordonnées au temps avec le système CASSY. Le logiciel CASSY détermine directement les relations de phase entre les quatre grandeurs et calcule en plus les puissances dépendantes du temps dans les circuits primaires et secondaires.



Transformation de la tension avec un transformateur en charge (P3.4.5.2).



TRANSFORMATEUR

P3.4.5.4
Transmission de puissance d'un transformateur

Transmission de puissance d'un transformateur (P3.4.5.4)

N° de cat.	Désignation	P3.4.5.4
562 11	Noyau en U avec joug	1
562 121	Agrafe d'assemblage avec pince à ressort	1
562 13	Bobine à 250 spires	2
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 011USB	Power-CASSY USB	1
524 220	CASSY Lab 2	1
537 34	Rhéostat à curseur 100 ohms	1
500 414	Câble de connexion 19 A, 25 cm, noir	1
500 444	Câble de connexion 19 A, 100 cm, noir	6
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

Le transformateur démontable à bobines multiples est proposé en alternative au transformateur pour travaux pratiques. Ces bobines peuvent être déplacées aisément sur les branches du noyau en U et peuvent ainsi être échangées facilement. Les expériences décrites pour le transformateur pour travaux pratiques (voir P3.4.5.1-3) sont évidemment applicables au transformateur démontable mais de nouvelles expériences peuvent aussi être proposées.

L'expérience P3.4.5.4 consiste à étudier la transmission de puissance d'un transformateur. Pour ce faire, les valeurs efficaces de la tension primaire et de la tension secondaire et celles du courant primaire et du courant secondaire pour une résistance de charge variable $R = 0 - 100 \Omega$ sont mesurées simultanément avec le système CASSY. En même temps, on détermine le déphasage entre tension et courant du côté primaire et du côté secondaire. Pour l'exploitation, on détermine la puissance primaire P_1 , la puissance secondaire P_2 et le rendement

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Puis on les représente graphiquement en fonction de la résistance de charge R .

MESURE DU CHAMP GÉOMAGNÉTIQUE

P3.4.6.2
Mesure du champ magnétique terrestre avec une bobine d'induction en rotation et CASSY



Mesure du champ magnétique terrestre avec une bobine d'induction en rotation et CASSY (P3.4.6.2)

N° de cat.	Désignation	P3.4.6.2
555 604	Paire de bobines de Helmholtz	1
348 22	Axe de gyroscope	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1
524 0401	Capteur de $\mu\text{V S}$	1
301 01	Noix Leybold	1
666 615	Noix universelle	1
501 44	Câble de connexion 19 A, 25 cm, rouge/bleu, paire	1

Dans l'expérience P3.4.6.2, on mesure la tension $U(t)$ d'une bobine en rotation dans le champ magnétique terrestre. Les valeurs mesurées sont enregistrées ou transmises sans fil avec un Mobile-CASSY. L'amplitude et la fréquence de la tension relevée sont utilisées pour déterminer la composante horizontale du champ magnétique terrestre.

GÉNÉRATEURS ÉLECTRIQUES

P3.5.2.1

Génération d'une tension alternative avec une génératrice à pôles intérieurs (dynamo) et une génératrice à pôles extérieurs

P3.5.2.2

Génération d'une tension continue avec une génératrice à pôles extérieurs

P3.5.2.3

Génération d'une tension alternative avec un alternateur de centrale électrique (alternateur à pôle intérieur électromagnétique)

P3.5.2.4

Génération de tension avec un générateur CA-CC (générateur à pôle extérieur électromagnétique)



Génération d'une tension alternative avec un alternateur de centrale électrique (alternateur à pôle intérieur électromagnétique) (P3.5.2.3)

N° de cat.	Désignation	P3.5.2.1	P3.5.2.2	P3.5.2.3	P3.5.2.4
563 480	Collection de base MEE	1	1	1	1
727 81	Unité de base pour machine	1	1	1	1
563 303	Entraînement manuel MEE	1	1	1	1
726 19	Cadre profilé SL85, un seul étage	1	1	1	1
531 120	Multimètre LDanalog 20	2	1	2	2
313 27	Chronomètre manuel, 60s/0,2s	1			
537 36	Rhéostat à curseur 1000 ohms	1			
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	1		1	1
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	1		1	1
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	2	1	2	2
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	2	1	1	2
563 23	Rotor tripolaire MEE		1*		
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265		1*		
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm		1*		
521 487	Alimentation CA/CC PRO 0...12 V/3 A			1	1

* complément recommandé

Les générateurs électriques fonctionnent selon l'induction élec-tromagnétique de Faraday afin de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. On différencie les génératrices à pôles extérieurs (excitation d'un champ magnétique dans le stator, induction dans le rotor) et les génératrices à pôles intérieurs (excitation d'un champ magnétique dans le rotor, induction dans le stator).

Les deux types de génératrices sont montés avec un aimant permanent dans l'expérience P3.5.2.1. On mesure la tension alternative U induite en fonction de la vitesse de rotation f du rotor. Par ailleurs, à vitesse de rotation constante, on détermine la puissance électrique P fournie en fonction de la résistance de charge R .

L'expérience P3.5.2.2 démontre l'utilisation d'un commutateur pour redresser la tension alternative produite dans le rotor d'une génératrice à pôles extérieurs. Le nombre de demi-ondes redressées par tour de rotor augmente lorsque l'on remplace le rotor bipolaire par un rotor tripolaire.

Dans les expériences P3.5.2.3 et P3.5.2.4, on étudie des générateurs où les aimants permanents ont été remplacés par des électroaimants. Dans ce cas, la tension induite dépend du courant d'excitation du champ magnétique. La puissance fournie peut être variée avec le courant d'excitation, sans que la vitesse de rotation du rotor et la fréquence de la tension alternative ne soient changées. Ce principe est utilisé dans les alternateurs de centrale électrique. On peut également prélever une tension redressée sur le générateur CA/CC à l'aide d'un commutateur.

MOTEURS ÉLECTRIQUES

P3.5.3.1

Etude d'un moteur à courant continu à rotor bipolaire

P3.5.3.2

Etude d'un moteur à courant continu à rotor tripolaire

P3.5.3.3

Etude d'un moteur universel shunt

P3.5.3.4

Montage d'un moteur synchrone à courant alternatif



Etude d'un moteur universel shunt (P3.5.3.3)

N° de cat.	Désignation	P3.5.3.1	P3.5.3.2	P3.5.3.3	P3.5.3.4
563 480	Collection de base MEE	1	1	1	1
727 81	Unité de base pour machine	1	1	1	1
726 19	Cadre profilé SL85, un seul étage	1	1	1	1
521 391	Alimentation CA/CC 0...24 V/5 A	1	1	1	1
451 281	Stroboscope	1	1	1	1
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	1	1	1	1
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1	1	1	2
563 23	Rotor tripolaire MEE		1	1*	
531 120	Multimètre LD analog 20		1	1	
314 151	Dynamomètre de précision, 2,0 N		1	1	
314 161	Dynamomètre de précision, 5,0 N		1	1	
309 50	Fil de démonstration		1	1	
666 470	Support avec noix, réglable en hauteur, CPS		1	1	
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø		1	1	
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge		1	2	
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu			2	
563 303	Entraînement manuel MEE				1
579 13	Interrupteur à bascule STE 2/19				1
579 06	Douille pour lampe, en haut, STE 2/19				1
505 181	Ampoules 24 V/3 W, E10, jeu de 5				1

* complément recommandé

Les moteurs électriques utilisent la force agissant sur des conducteurs parcourus par un courant dans un champ magnétique, afin de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique. On différencie les moteurs asynchrones où un courant continu ou alternatif est fourni au rotor au moyen d'un commutateur, et les moteurs synchrones qui n'ont pas de commutateur et dont la fréquence de rotation est synchronisée avec la fréquence de la tension appliquée.

Le fonctionnement de base d'un moteur électrique avec commutateur est étudié dans l'expérience P3.5.3.1. Le moteur est composé d'un aimant permanent en tant que stator et d'un rotor bipolaire. La polarisation du courant du rotor détermine le sens de rotation du rotor. On mesure la relation entre la tension appliquée U et la vitesse de rotation à vide f_0 atteinte.

L'utilisation d'un rotor tripolaire fait l'objet de l'expérience P3.5.3.2. Le rotor démarre de manière autonome étant donné qu'un couple agit sur lui pour toute position de ce dernier dans le champ magnétique. Pour enregistrer une courbe de couple $M(f)$, on mesure la vitesse de rotation f du rotor en fonction du couple antagoniste M . On compare par ailleurs la puissance mécanique fournie avec la puissance électrique absorbée.

L'expérience P3.5.3.3 consiste à étudier un moteur dit universel, où les champs du stator et du rotor sont excités électriquement. Les bobines du stator et du rotor sont reliées en série ou en parallèle (shunt) à une source de tension commune. Le moteur peut être alimenté avec une tension continue ou alternative étant donné que le couple sur le rotor ne change pas lorsque la polarisation varie. On enregistre la courbe de couple $M(f)$ pour les deux branchements. Il s'avère que la vitesse de rotation du moteur shunt dépend moins de la charge que celle du moteur série.

L'expérience P3.5.3.4 consiste à synchroniser manuellement le rotor bobiné du moteur synchrone à courant alternatif avec la fréquence de la tension appliquée, afin qu'il fonctionne de manière autonome par la suite.

MACHINES À COURANT TRIPHASÉ

P3.5.4.1

Etude d'une génératrice à courant triphasé à pôles extérieurs

P3.5.4.2

Etude d'une génératrice à courant triphasé à pôles intérieurs

P3.5.4.3

Comparaison des montages en étoile et en triangle pour une génératrice à courant triphasé

P3.5.4.4

Montage d'un moteur synchrone à courant triphasé et d'un moteur asynchrone à courant triphasé



Comparaison des montages en étoile et en triangle pour une génératrice à courant triphasé (P3.5.4.3)

N° de cat.	Désignation	P3.5.4.1	P3.5.4.2	P3.5.4.3	P3.5.4.4
563 480	Collection de base MEE	1	1	1	1
563 481	Collection complémentaire MEE	1	1	1	1
727 81	Unité de base pour machine	1	1	1	1
563 303	Entraînement manuel MEE	1	1	1	1
726 19	Cadre profilé SL85, un seul étage	1	1	1	1
531 120	Multimètre LDanalog 20	3	3	2	1
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir	6	6	7	4
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1*	1*		
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	2*	2*		
313 27	Chronomètre manuel, 60s/0,2s	1*	1*		
521 487	Alimentation CA/CC PRO 0...12 V/3 A		1	1	
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge		1	3	1
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu		1	2	1
579 06	Douille pour lampe, en haut, STE 2/19			3	
505 14	Ampoules 6 V/3 W, E10, jeu de 10			1	
501 48	Cavalier STE 2/19, jeu de 10			1	
500 614	Câble de connexion de sécurité 25 cm, noir			3	3
563 12	MEE Rotor en court-circuit				1
521 291	Transformateur triphasé TBT				1

* complément recommandé

La réalisation technique de l'alimentation en énergie se fonde en grande partie sur la production de courant alternatif à trois phases, le courant dit triphasé. Ainsi, les alternateurs et moteurs à courant triphasé ont une signification particulière dans la pratique. En principe, leur fonctionnement correspond à celui des machines à courant alternatif. Comme pour les machines à courant alternatif, on différencie les alternateurs à pôles extérieurs et à pôles intérieurs ainsi que les moteurs synchrones et asynchrones.

Dans l'expérience P3.5.4.1, on réalise un alternateur à pôles extérieurs à partir d'un rotor tripolaire en rotation dans un champ magnétique permanent. Il s'agit là du montage le plus simple pour la production de courant triphasé.

L'expérience P3.5.4.2 consiste à étudier la variante de l'alternateur à pôles intérieurs, nettement plus répandue. Dans le cas de l'alternateur à pôles intérieurs, le champ magnétique du rotor induit des tensions alternatives déphasées l'une par rapport à l'autre dans les bobines du stator. Dans les deux cas, on place un appareil de mesure entre deux prises afin de mesurer le courant ou la tension, et afin d'observer le déphasage lorsque le rotor tourne à vitesse réduite. Lorsqu'il tourne à grande vitesse, on mesure le déphasage avec un oscilloscope.

Dans l'expérience P3.5.4.3, on branche des récepteurs à l'alternateur, en montage étoile et triangle à la génératrice à courant triphasé. Dans le montage étoile, on étudie la relation

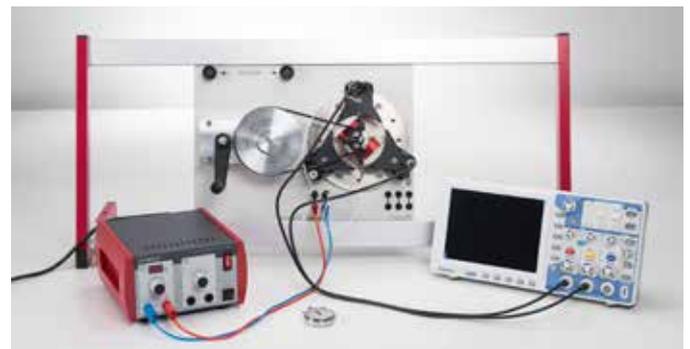
$$\frac{U_{aa}}{U_{a0}} = \sqrt{3}$$

pour la tension U_{aa} entre deux conducteurs extérieurs, et pour U_{a0} entre un conducteur extérieur et un conducteur neutre. Dans le montage triangle, on a le résultat

$$\frac{I_1}{I_2} = \sqrt{3}$$

avec les courants I_1 arrivant aux récepteurs et les courants I_2 traversant les bobines de l'alternateur.

Dans l'expérience P3.5.4.4, on étudie le comportement de moteurs synchrone et asynchrone lors d'un changement du sens de rotation.



Il peut également être affiché avec un oscilloscope (P3.5.4.2).

CIRCUITS ÉLECTRIQUES AVEC UN CONDENSATEUR

P3.6.1.1

Charge et décharge d'un condensateur à l'enclenchement et à la coupure d'un courant continu

P3.6.1.2

Détermination de la résistance capacitive d'un condensateur dans un circuit à courant alternatif

P3.6.1.3

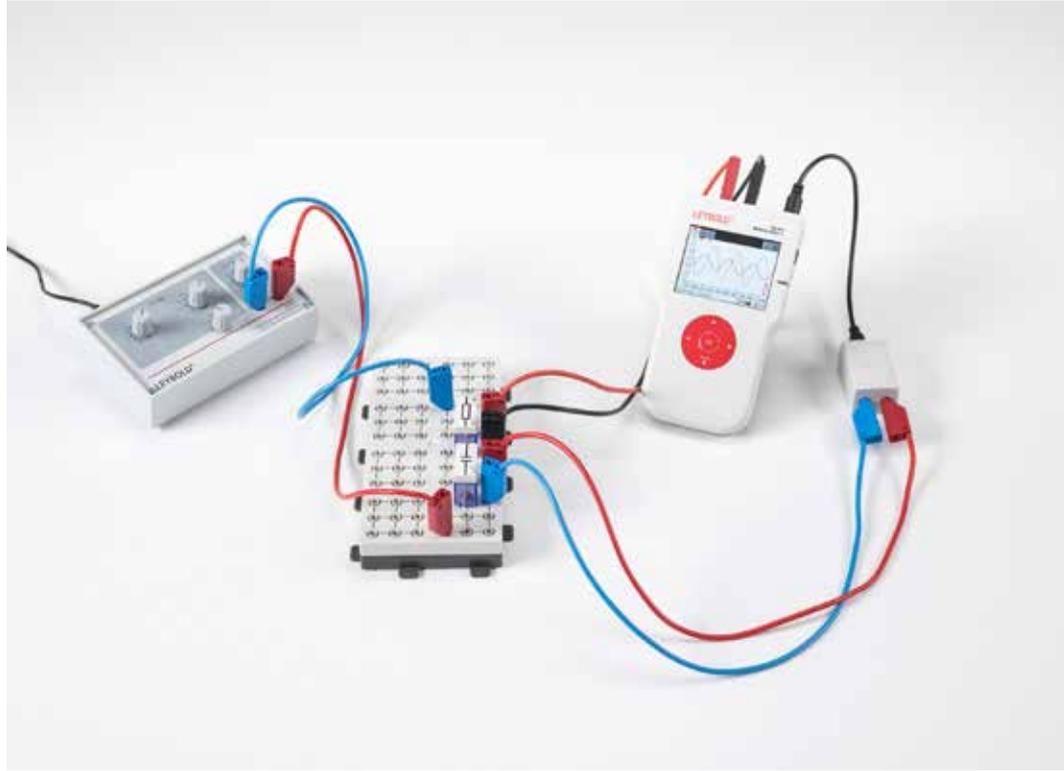
Charge et décharge d'un condensateur à l'enclenchement et à la coupure d'un courant continu - mesure avec un multimètre

P3.6.1.4

Charge et décharge d'un condensateur à l'enclenchement et à la coupure d'un courant continu - Mesure avec Mobile-CASSY

P3.6.1.5

Détermination de la résistance capacitive d'un condensateur dans un circuit à courant alternatif - Mesure avec Mobile-CASSY



Détermination de la résistance capacitive d'un condensateur dans un circuit à courant alternatif - Mesure avec Mobile-CASSY (P3.6.1.5)

N° de cat.	Désignation	P3.6.1.1	P3.6.1.2	P3.6.1.3	P3.6.1.4	P3.6.1.5
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité, 20/10	1	1	1	1	1
578 15	Condensateur 1 µF, STE 2/19	3	3		3	3
577 40	Résistance 470 Ohms, STE 2/19	1			1	
577 44	Résistance 1 kOhm, STE 2/19	1			1	
577 48	Résistance 2,2 kohms, STE 2/19	1			1	
522 621	Générateur de fonctions S 12	1	1		1	1
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1	1			
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	2	2			
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	1	1		3	3
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1	1		2	2
577 19	Résistance 1 ohm, STE 2/19		1			
577 20	Résistance 10 ohms, STE 2/19		1			1
578 16	Condensateur 4,7 µF, STE 2/19			1		
578 12	Condensateur 10 µF, STE 2/50			1		
577 76	Résistance 1 Mohm, STE 2/19			1		
582 81	Commutateur STE 4/50			1		
501 48	Cavalier STE 2/19, jeu de 10			1		
521 487	Alimentation CA/CC PRO 0...12 V/3 A			1		
531 120	Multimètre LDanalog 20			1		
313 27	Chronomètre manuel, 60s/0,2s			1		
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge		2			
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu		2			
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN				1	1
524 438	Capteur de tension M, ±30 V				1	1
500 644	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, noir				1	1

Pour l'étude du comportement des condensateurs dans des circuits à courants continu et alternatif, on mesure la tension U_c aux bornes du condensateur avec un oscilloscope à deux canaux, et on détermine le courant I_c dans un condensateur à partir de la chute de tension dans une résistance ohmique R branchée en série. Les montages nécessaires sont réalisés à l'aide du système enfichable STE sur une plaque à réseau. Un générateur de fonctions sert de source de tension à amplitude et fréquence variables.

Dans l'expérience P3.6.1.1 et P3.6.1.4, le générateur de fonctions produit des signaux rectangulaires périodiques qui représentent l'enclenchement et la coupure d'un courant continu. Les signaux rectangulaires sont représentés avec le canal 1 de l'oscilloscope, la tension ou le courant du condensateur sont représentés avec le canal 2. On détermine la constante de temps

$$\tau = R \cdot C$$

de manière expérimentale, pour différentes capacités C d'après la variation exponentielle du courant I_c de charge ou de décharge.

Dans l'expérience P3.6.1.2 et P3.6.1.5, on applique une tension alternative d'amplitude U_0 et de fréquence f à un condensateur. La tension $U_c(t)$ et le courant $I_c(t)$ sont représentés simultanément sur l'oscilloscope. Il s'avère que le courant est en quadrature avant par rapport à la tension. On confirme par ailleurs la proportionnalité entre amplitude de tension U_0 et amplitude de courant I_0 . Pour la constante de proportionnalité

$$Z_c = \frac{U_0}{I_0}$$

on démontre la relation

$$Z_c = -\frac{1}{2\pi f \cdot C}$$

Dans l'expérience P3.6.1.3 un gros condensateur avec une longue constante de temps est chargé et déchargé lentement. La courbe de tension est enregistrée à l'aide d'un multimètre et un chronomètre.

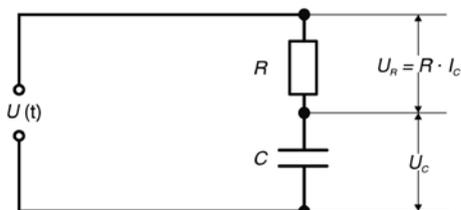


Schéma du circuit (P3.6.1.2+5).

CIRCUITS ÉLECTRIQUES AVEC UNE BOBINE

P3.6.2.1
Mesure de l'allure du courant dans une bobine à l'enclenchement et à la coupure d'un courant continu

P3.6.2.2
Détermination de la résistance inductive d'une bobine dans un circuit à courant alternatif

P3.6.2.3
Mesure de l'allure du courant dans une bobine à l'enclenchement et à la coupure d'un courant continu - Mesure avec Mobile-CASSY

P3.6.2.4
Détermination de la résistance inductive d'une bobine dans un circuit à courant alternatif - Mesure avec Mobile-CASSY



Mesure de l'allure du courant dans une bobine à l'enclenchement et à la coupure d'un courant continu - Mesure avec Mobile-CASSY (P3.6.2.3)

N° de cat.	Désignation	P3.6.2.1	P3.6.2.2	P3.6.2.3	P3.6.2.4
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité, 20/10	1	1	1	1
590 84	Bobine à 1000 spires STE 2/50	2	2	2	2
577 19	Résistance 1 ohm, STE 2/19	1	1		
577 20	Résistance 10 ohms, STE 2/19	1	1	1	1
577 24	Résistance 22 ohms, STE 2/19	1		1	
577 28	Résistance 47 Ohms, STE 2/19	1		1	
501 48	Cavalier STE 2/19, jeu de 10	1	1		
522 621	Générateur de fonctions S 12	1	1	1	1
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1	1		
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	2	2		
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	1	1	3	3
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1	1	2	2
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN			1	1
524 438	Capteur de tension M, ±30 V			1	1
500 644	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, noir			1	1

Pour l'étude du comportement des bobines dans des circuits continu et alternatif, on mesure la tension U_L sur la bobine avec un oscilloscope à deux canaux. On détermine en plus le courant I_L traversant la bobine à partir de la chute de tension dans une résistance ohmique R branchée en série. Les montages nécessaires sont réalisés à l'aide du système enfichable Electrique/Electronique STE avec une plaque à réseau. Un générateur de fonctions sert de source de tension à amplitude et fréquence variables.

Dans l'expérience P3.6.2.1 et P3.6.2.3, le générateur de fonctions produit des signaux rectangulaires périodiques qui représentent l'enclenchement et la coupure d'un courant continu. Les signaux rectangulaires sont représentés avec le canal 1 de l'oscilloscope, la tension ou le courant de la bobine sont représentés avec le canal 2. On détermine la constante de temps

$$\tau = \frac{L}{R}$$

de manière expérimentale, pour différentes inductances L d'après la variation exponentielle de la tension U_L de la bobine.

Dans l'expérience P3.6.2.2 et P3.6.2.4, on applique une tension alternative d'amplitude U_0 et de fréquence f à une bobine. La tension $U_L(t)$ et le courant $I_L(t)$ sont représentés simultanément sur l'oscilloscope. Il s'avère que le courant est en quadrature arrière par rapport à la tension. On confirme par ailleurs la proportionnalité entre amplitude de tension U_0 et amplitude de courant I_0 . Pour la constante de proportionnalité

$$Z_L = \frac{U_0}{I_0}$$

on démontre la relation

$$Z_L = 2\pi f \cdot L$$

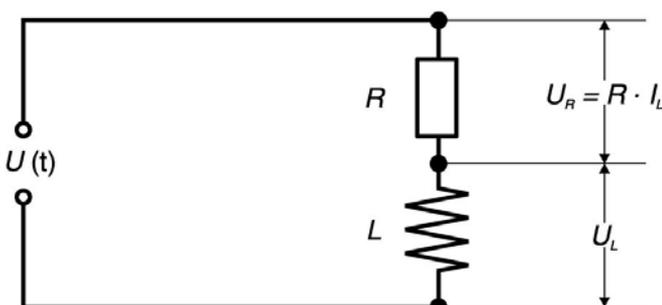


Schéma du circuit (P3.6.2.2+4)

RÉSISTANCES DE COURANT ALTERNATIF

P3.6.3.1

Détermination de la résistance en courant alternatif dans des circuits électriques avec condensateurs et résistances ohmiques

P3.6.3.2

Détermination de la résistance en courant alternatif dans des circuits électriques avec bobines et résistances ohmiques

P3.6.3.3

Détermination de la résistance en courant alternatif dans des circuits électriques avec condensateurs et bobines

P3.6.3.4

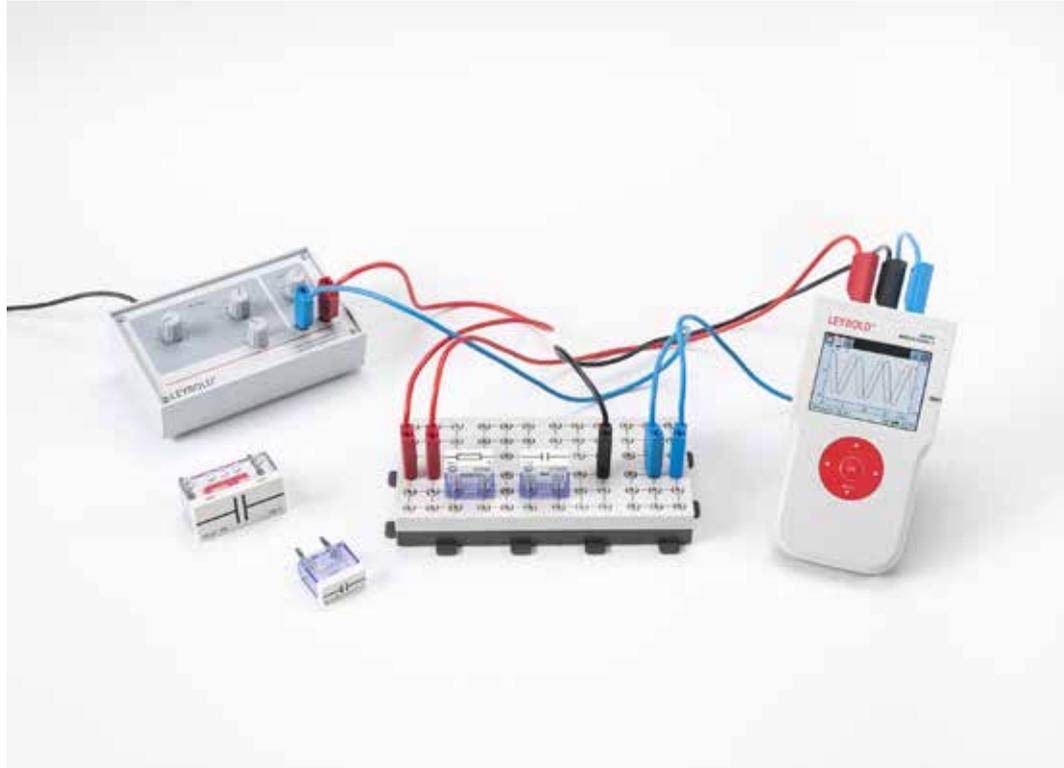
Détermination de la résistance en courant alternatif dans des circuits électriques avec condensateurs et résistances ohmiques - Mesure avec Mobile-CASSY

P3.6.3.5

Détermination de la résistance en courant alternatif dans des circuits électriques avec bobines et résistances ohmiques - Mesure avec Mobile-CASSY

P3.6.3.6

Détermination de la résistance en courant alternatif dans des circuits électriques avec condensateurs et bobines



Détermination de la résistance en courant alternatif dans des circuits électriques avec condensateurs et résistances ohmiques - Mesure avec Mobile-CASSY (P3.6.3.4)

N° de cat.	Désignation	P3.6.3.1	P3.6.3.2	P3.6.3.3	P3.6.3.4	P3.6.3.5	P3.6.3.6
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité , 20/10	1	1	1	1	1	1
577 19	Résistance 1 ohm, STE 2/19	1	1				
577 32	Résistance 100 Ohms, STE 2/19	1	1	1	1	1	1
578 12	Condensateur 10 µF, STE 2/50	1			1		
578 15	Condensateur 1 µF, STE 2/19	1		1	1		1
578 31	Condensateur 0,1 µF, STE 2/19	1			1		
522 621	Générateur de fonctions S 12	1	1	1	1	1	1
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1	1	1			
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	2	2	2			
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	1	1	1	2	2	3
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1	1	1	2	2	2
590 83	Bobine à 500 spires STE 2/50			1	1	1	1
590 84	Bobine à 1000 spires STE 2/50			1	1	1	1
577 20	Résistance 10 ohms, STE 2/19				1		1
578 16	Condensateur 4,7 µF, STE 2/19				1		1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN					1	1
500 644	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, noir				1	1	1
524 438	Capteur de tension M, ±30 V						1

Avec l'oscilloscope à deux canaux, on mesure le courant $I(t)$ et la tension $U(t)$ dans un circuit à courant alternatif en tant que grandeurs subordonnées au temps. Un générateur de fonctions sert de source de tension d'amplitude U_0 et de fréquence f variables. On détermine la valeur de la résistance totale

$$Z = \frac{U_0}{I_0}$$

et le déphasage ϑ entre courant et tension à partir des grandeurs mesurées.

Dans l'expérience P3.6.3.1 et P3.6.3.4, on combine une capacité C avec une résistance R , dans l'expérience P3.6.3.2 et P3.6.3.5, on combine une inductance L avec une résistance R . Pour le montage en série on confirme la relation

$$Z_s = \sqrt{R^2 + Z_1^2} \text{ et } \tan \varphi_s = \frac{Z_1}{R}$$

$$\text{avec } Z_1 = -\frac{1}{2\pi f \cdot C} \text{ soit } Z_1 = 2\pi f \cdot L$$

pour le montage en parallèle

$$\frac{1}{Z_p} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{Z_1^2}} \text{ et } \tan \varphi_p = \frac{R}{Z_1}$$

Dans l'expérience P3.6.3.3 et P3.6.3.6, on étudie le circuit oscillant en tant que montage série et parallèle de capacité et inductance. La résistance totale du montage série

$$Z_s = 2\pi f \cdot L - \frac{1}{2\pi f \cdot C}$$

disparaît pour la fréquence de résonance

$$f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}$$

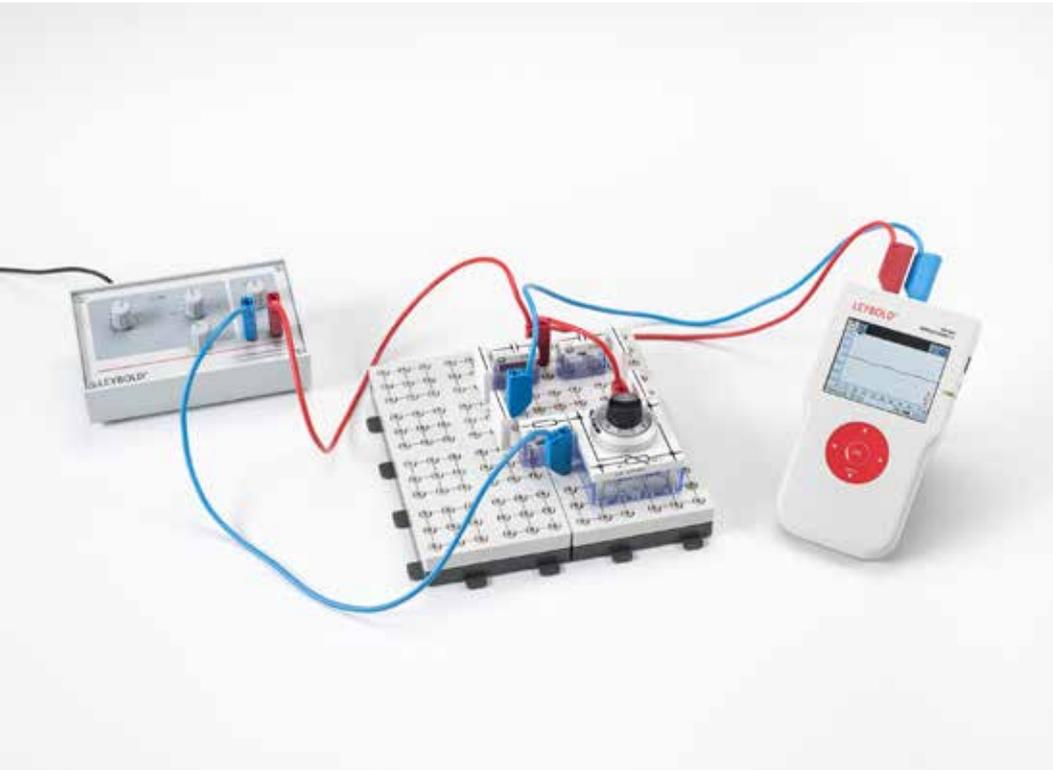
c.-à-d. que pour un courant donné I , la tension totale U aux bornes du condensateur et de la bobine est nulle, car les tensions unitaires U_C et U_L sont exactement opposées. Pour le montage en parallèle, on a

$$\frac{1}{Z_p} = \frac{1}{2\pi f \cdot L} - 2\pi f \cdot C$$

Sa résistance pour la fréquence de résonance est infiniment grande, c.-à-d. que pour une tension donnée U , le courant total I dans la ligne d'arrivée est nul étant donné que les deux courants unitaires I_C et I_L sont exactement opposés. en série.

CIRCUITS DE PONTS DE MESURE

- P3.6.4.1
Détermination de résistances capacitives avec un pont de mesure de Wien
- P3.6.4.2
Détermination de résistances inductives avec un pont de mesure de Maxwell
- P3.6.4.3
Détermination de résistances capacitives avec un pont de mesure de Wien - Mesure avec Mobile-CASSY
- P3.6.4.4
Détermination de résistances inductives avec un pont de mesure de Maxwell - Mesure avec Mobile-CASSY



Détermination de résistances capacitives avec un pont de mesure de Wien - Mesure avec Mobile-CASSY (P3.6.4.3)

N° de cat.	Désignation	P3.6.4.1	P3.6.4.2	P3.6.4.3	P3.6.4.4
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité , 20/10	2	2	2	2
577 32	Résistance 100 Ohms, STE 2/19	1	1	1	1
577 93	Potentiomètre 1 kohm, 10 tours, STE 4/50	1	2	1	2
578 15	Condensateur 1 µF, STE 2/19	1	1	1	
578 16	Condensateur 4,7 µF, STE 2/19	1	1	1	1
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1	1		
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	1	1		
522 621	Générateur de fonctions S 12	1	1	1	1
501 48	Cavalier STE 2/19, jeu de 10	1	1	1	1
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	1	1	2	2
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	1	1	1	1
590 83	Bobine à 500 spires STE 2/50		1		1
590 84	Bobine à 1000 spires STE 2/50		1		1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN			1	1
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir			1	1

On emploie le pont de mesure de Wheatstone pour déterminer précisément des résistances ohmiques dans des circuits à courant continu et alternatif. Des montages en pont analogues permettent de déterminer des résistances inductives et capacitives. Ces ponts de mesure sont composés de quatre branches de pont passives branchées en carré, d'une branche indicatrice avec un instrument à zéro, et d'une branche d'alimentation avec la source de tension. Le courant dans la branche indicatrice est ramené à zéro en réglant les éléments variables dans la branche en pont. Pour les résistances du montage, on a donc la relation fondamentale

$$Z_1 = Z_2 \cdot \frac{Z_3}{Z_4}$$

qui permet de calculer la grandeur Z_1 à mesurer.

Dans l'expérience P3.6.4.1 et P3.6.4.3, on étudie le principe d'un pont de mesure de Wien pour la mesure d'une résistance capacitive Z_1 . Dans ce cas, Z_2 est une résistance capacitive fixe, Z_3 une résistance ohmique fixe et Z_4 une résistance ohmique variable. Pour la compensation à zéro, la relation suivante est valable indépendamment de la fréquence de la tension alternative

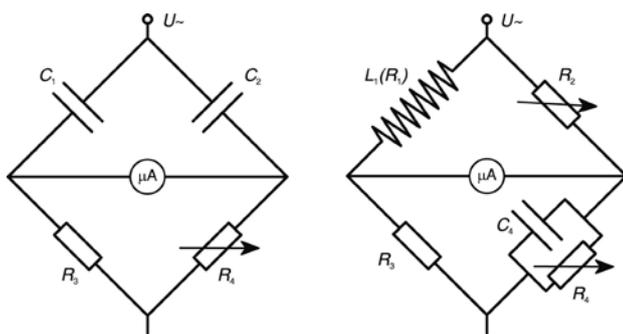
$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_2} \cdot \frac{R_3}{R_4}$$

Un oscilloscope ou le Mobile-CASSY 2 peuvent être utilisés comme indicateur de zéro.

Dans l'expérience P3.6.4.2 et P3.6.4.4, on monte un pont de mesure de Maxwell pour déterminer une résistance inductive Z_1 . Etant donné que la partie ohmique de Z_1 doit également être compensée, ce montage est un peu plus compliqué. Dans ce cas, Z_2 est une résistance ohmique variable, Z_3 une résistance ohmique fixe et Z_4 est un montage en parallèle de résistances capacitive et ohmique variables. Pour la compensation à zéro, on a la relation suivante pour la partie inductive

$$2\pi f \cdot L_1 = R_2 \cdot R_3 \cdot 2\pi f \cdot C_4$$

f : fréquence de la tension alternative



Circuit de principe: Pont de Wien - Pont de Maxwell (P3.6.4.1-4)

TRAVAIL ÉLECTRIQUE ET PUISSANCE

P3.6.6.1

Détermination de la puissance de chauffage d'une charge ohmique dans un circuit à courant alternatif en fonction de la tension appliquée



Détermination de la puissance de chauffage d'une charge ohmique dans un circuit à courant alternatif en fonction de la tension appliquée (P3.6.6.1)

N° de cat.	Désignation	P3.6.6.1
384 52	Calorimètre en aluminium	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1
521 391	Alimentation CA/CC 0...24 V/5 A	1
590 06	Bécher gradué SAN, 1000 ml	1
501 28	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, noir	4

La relation suivante existe entre la puissance P d'une résistance R et la tension continue U appliquée.

$$P = \frac{U^2}{R}$$

La même relation est valable pour la tension alternative si P est la puissance moyenne et si on remplace U par la valeur efficace

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$$

U_0 : amplitude de la tension alternative

La relation

$$P = U \cdot I$$

peut être appliquée à des résistances ohmiques dans des circuits à courant alternatif, si l'on remplace le courant continu I par la valeur efficace du courant alternatif

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

I_0 : amplitude du courant alternatif

Dans l'expérience P3.6.6.1, on détermine la puissance électrique d'un thermoplongeur pour de petites tensions à partir de la chaleur cédée par effet Joule par unité de temps. Puis on la compare avec la tension appliquée U_{eff} . On confirme la relation

$$P \sim U_{\text{eff}}^2$$

TRAVAIL ÉLECTRIQUE ET PUISSANCE

P3.6.6.3

Comparaison quantitative entre la puissance du courant continu et celle du courant alternatif avec une ampoule incandescente

P3.6.6.4

Détermination des facteurs de crête de différentes formes de signaux du courant alternatif

P3.6.6.5

Détermination de la puissance active et de la puissance réactive dans des circuits à courant alternatif



Détermination de la puissance active et de la puissance réactive dans des circuits à courant alternatif (P3.6.6.5)

N° de cat.	Désignation	P3.6.6.3	P3.6.6.4	P3.6.6.5
531 831	Joulemètre-wattmètre	1	1	1
505 14	Ampoules 6 V/3 W, E10, jeu de 10	1		
579 06	Douille pour lampe, en haut, STE 2/19	2		
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité, 20/10	1		
521 487	Alimentation CA/CC PRO 0...12 V/3 A	1		
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	1		
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	1		
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	2		
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	2		
522 621	Générateur de fonctions S 12		1	
536 131	Résistance de mesure 100 ohms		1	
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265		1	1
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm		1	1
501 45	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, rouge/bleu, paire		2	1
521 391	Alimentation CA/CC 0...24 V/5 A			1
537 35	Rhéostat à curseur 330 ohms			1
517 021	Condensateur 40 µF			1
562 11	Noyau en U avec joug			1
562 121	Agrafe d'assemblage avec pince à ressort			1
562 15	Bobine à 1000 spires			1
575 35	Adaptateur BNC/4 mm, bipolaire			1
504 45	Interrupteur unipolaire			1
500 421	Câble de connexion 19 A, 50 cm, rouge			2
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire			2

La puissance électrique d'une tension $U(t)$ fonction du temps traversant une résistance de charge quelconque dépend du temps.

$$P(t) = U(t) \cdot I(t)$$

$I(t)$: courant subordonné au

temps dans la résistance de charge

Pour des tensions et courants périodiques, on considère en général la puissance moyenne sur une période T . Cette grandeur est souvent appelée puissance efficace P_W . Elle peut se mesurer électroniquement avec le joulemètre et wattmètre pour des tensions alternatives ou continues quelconques.

Dans l'expérience P3.6.6.3, on utilise deux ampoules à incandescence semblables de même puissance électrique: une ampoule à tension continue et l'autre à tension alternative. L'égalité des puissances est vérifiée directement avec le joulemètre et wattmètre et peut se vérifier en supplément en comparant les intensités lumineuses. L'égalité des puissances est atteinte lorsque la tension continue correspond à la valeur efficace de la tension alternative.

Dans l'expérience P3.6.6.4, on détermine expérimentalement les facteurs de crête, à savoir les quotients des amplitudes U_0 et des valeurs efficaces U_{eff} pour différents signaux de tension alternative produits avec un générateur de fonctions. L'amplitude est mesurée avec un oscilloscope. On calcule la valeur efficace selon la formule suivante, avec la puissance P que l'on mesure sur une résistance ohmique R avec le joulemètre et wattmètre

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{P \cdot R}$$

Dans l'expérience P3.6.6.5, on mesure le courant I_{eff} dans une charge quelconque et la puissance efficace P_W pour une tension alternative fixe U_{eff} . Pour vérifier la relation

$$P_W = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos \varphi$$

on détermine en supplément le déphasage entre tension et courant avec un oscilloscope. L'expérience montre par ailleurs que la puissance efficace est nulle pour une charge purement capacitive ou inductive, étant donné que le déphasage ϑ est égal à 90° . On a la puissance apparente

$$P_s = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$$

CIRCUIT OSCILLANT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

P3.7.1.1
Oscillations électromagnétiques libres



Oscillations électromagnétiques libres (P3.7.1.1)

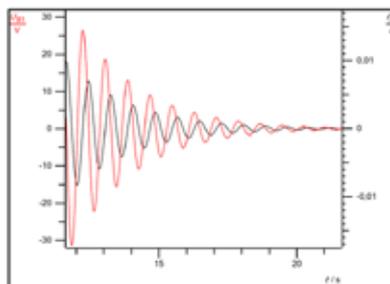
N° de cat.	Désignation	P3.7.1.1
517 011	Bobine à haute inductance	1
517 021	Condensateur 40 µF	1
301 339	Paire d'embases	2
501 48	Cavalier STE 2/19, jeu de 10	1
521 487	Alimentation CA/CC PRO 0...12 V/3 A	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	2
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	2

Les ondes électromagnétiques ont généralement lieu dans une plage de fréquence où il est impossible d'observer des oscillations à l'oeil nu. La situation est différente dans un circuit oscillant composé d'un condensateur de grande capacité ($C = 40 \mu\text{F}$) et d'une bobine à haute inductance ($L = 500 \text{ H}$). Dans ce cas, la période d'oscillation est de 1 s, ainsi les oscillations de la tension ou du courant peuvent être visualisées directement sur l'instrument à cadran.

L'expérience P3.7.1.1 consiste à étudier les oscillations électromagnétiques libres. L'atténuation est si faible que plusieurs périodes d'oscillations peuvent être suivies, et leur durée peut se mesurer. On observe les écarts entre période d'oscillation mesurée et période d'oscillation calculée à partir de la formule de Thomson

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$$

Ces écarts s'expliquent par le fait que l'inductance dépend du courant, étant donné que la perméabilité du noyau en fer de la bobine dépend de l'intensité du champ magnétique.



Oscillation électromagnétique amortie dans la gamme de 1 Hz (P3.7.1.1).

ONDES DÉCIMÉTRIQUES

P3.7.2.1
Direction du rayonnement et polarisation d'ondes décimétriques

P3.7.2.2
Modulation d'amplitude des ondes décimétriques

P3.7.2.4
Évaluation de la constante diélectrique de l'eau dans le domaine des ondes décimétriques



Évaluation de la constante diélectrique de l'eau dans le domaine des ondes décimétriques (P3.7.2.4)

N° de cat.	Désignation	P3.7.2.1	P3.7.2.2	P3.7.2.4
587 551	Émetteur d'ondes décimétriques	1	1	1
531 110	Multimètre LDanalog 10	1		
300 11	Socle	2	3	1
501 38	Câble d'expérimentation 32 A, 200 cm, noir	2		
522 621	Générateur de fonctions S 12		1	
532 20	Amplificateur CA/CC 30 W		1	
587 08	Haut-parleur à large bande		1	
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm		1	
501 33	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, noir		4	
587 54	Dipôles dans cuve d'eau, jeu			1

Comme c'est le cas dans un circuit oscillant, on peut exciter des oscillations électromagnétiques dans un conducteur droit. Un tel oscillateur émet des ondes électromagnétiques; l'intensité émise est maximale lorsque la longueur du conducteur correspond à la moitié de la longueur d'onde (on parle de dipôle $\lambda/2$). Les expériences à ce sujet réussissent particulièrement bien avec des longueurs d'ondes du domaine décimétrique. L'utilisation d'un deuxième dipôle de longueur $\lambda/2$ est le meilleur moyen de mettre en évidence ces ondes décimétriques; la tension du dipôle peut être amenée à une ampoule à incandescence ou à un appareil de mesure via un redresseur haute fréquence.

Dans l'expérience P3.7.2.1, on étudie d'abord la direction du rayonnement d'un dipôle $\lambda/2$ pour des ondes décimétriques. Pour ce faire, on positionne le récepteur parallèlement à l'émetteur et on le déplace autour de l'émetteur. Dans le deuxième essai, on tourne le récepteur relativement par rapport à l'émetteur, afin de mettre en évidence la polarisation des ondes décimétriques émises.

L'objet de l'expérience P3.7.2.2 est la transmission des signaux de fréquence acoustique avec des ondes décimétriques modulées en amplitude. Pour la modulation d'amplitude, on superpose au signal d'ondes décimétriques

$$E(t) = E_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$$

le signal acoustique $u(t)$ de la forme

$$E_{AM}(t) = E_0 \cdot (1 + k_{AM} \cdot u(t)) \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)$$

k_{AM} : facteur de couplage

Dans l'expérience P3.7.2.4, on démontre la diélectricité de l'eau. Dans l'eau et à fréquence constante, les ondes décimétriques se propagent avec des longueurs d'ondes plus courtes que dans l'air. Ainsi, un dipôle récepteur parfaitement réglé sur la longueur d'onde dans l'air ne convient pas parfaitement dans l'eau.

PROPAGATION DES ONDES DÉCIMÉTRIQUES LE LONG DE LIGNES

P3.7.3.1

Détermination des maxima de courant et de tension sur une ligne de Lécher

P3.7.3.2

Étude du courant et de la tension sur une ligne de Lécher avec dipôle trombone



Détermination des maxima de courant et de tension sur une ligne de Lécher (P3.7.3.1)

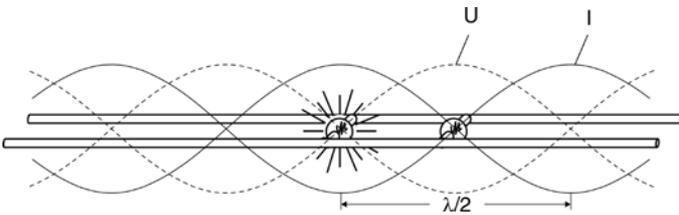
N° de cat.	Désignation	P3.7.3.1-2
587 551	Émetteur d'ondes décimétriques	1
587 56	Système de Lecher avec accessoires	1
311 78	Mètre ruban 2 m	1
300 11	Socle	3

L'idée d'utiliser deux fils parallèles pour la transmission redressée d'ondes électromagnétiques remonte à *E. Lecher* (1890). Une telle ligne de Lecher permet d'amener des ondes électromagnétiques à un endroit quelconque de la pièce. On les mesure le long de la ligne en tant que tension $U(x,t)$ se propageant sous forme d'onde ou en tant que courant $I(x,t)$.

L'expérience P3.7.3.1 consiste à étudier une ligne de Lecher ouverte d'un côté et court-circuitée de l'autre. Les ondes sont réfléchies aux extrémités de la ligne, de manière à ce qu'il y ait formation d'ondes stationnaires. Le courant est nul à l'extrémité ouverte et la tension est nulle à l'extrémité court-circuitée. Le courant et la tension sont décalés de $\lambda/4$ l'un par rapport à l'autre, c.-à-d. que les ventres d'ondes de la tension correspondent aux noeuds d'ondes du courant. Les maxima de tension sont étudiés avec un palpeur relié à une ampoule à incandescence. Les maxima de courant sont déterminés avec une boucle d'induction reliée à une ampoule à incandescence. On détermine la longueur d'onde λ à partir des distances d entre les maxima de courant ou de tension. On a

$$d = \frac{\lambda}{2}$$

Dans l'expérience P3.7.3.2, on fixe un dipôle émetteur (dipôle trombone $\lambda/2$) à l'extrémité de la ligne de Lecher. La ligne de Lecher même ne présente pas de maxima de tension ou de courant. On peut mettre en évidence un maximum de courant au milieu du dipôle, et des maxima de tension aux extrémités.



Les maxima de courant et de tension sur une ligne de Lecher (P3.7.3.1).

MICRO-ONDES

P3.7.4.1
Allure du champ et polarisation des micro-ondes devant une antenne à cornet

P3.7.4.2
Absorption des micro-ondes

P3.7.4.3
Détermination de la longueur d'onde pour des micro-ondes stationnaires

P3.7.4.4
Diffraction de micro-ondes

P3.7.4.5
Réfraction de micro-ondes

P3.7.4.6
Étude de la réflexion totale avec des micro-ondes



Diffraction de micro-ondes (P3.7.4.4)

N° de cat.	Désignation	P3.7.4.1-2	P3.7.4.3	P3.7.4.4	P3.7.4.5	P3.7.4.6
737 01	Oscillateur Gunn	1	1	1	1	1
737 020	Alimentation Gunn avec amplificateur	1	1	1	1	1
737 21	Grande antenne à cornet	1	1	1	1	1
737 35	Sonde de champ électrique	1	1	1	1	1
688 809	Tige de longueur 245 mm, 10 mm Ø, avec filet M6	1	1	1	1	1
737 27	Physique Accessoires micro-ondes I	1	1	1		
531 120	Multimètre LDanalog 20	1	1	1	1	1
300 11	Socle	2	2	4	2	1
501 022	Câble HF, 2 m	2	2	2	2	2
501 461	Câbles d'expérimentation 19 A, 100 cm, noirs, paire	1	1	1	1	1
737 390	Absorbeurs micro-ondes, jeu	1*	1*	1*	1*	1*
737 275	Physique Accessoires micro-ondes II		1	1	1	1
311 78	Mètre ruban 2 m		1			
300 02	Pied en V, petit					1

* complément recommandé

Les micro-ondes sont des ondes électromagnétiques de longueurs d'ondes comprises entre 0,1 mm et 100 mm. Elles sont produites dans une cavité résonnante par exemple où la fréquence est déterminée par le volume de la cavité. La mise en évidence se fait à l'aide d'une sonde de champ électrique, servant à mesurer la composante du champ électrique parallèle à la sonde. Le signal de sortie de la sonde est proportionnel au carré de l'intensité du champ et donc à l'intensité du courant.

Dans l'expérience P3.7.4.1, on étudie l'allure et la polarisation du champ hyperfréquence devant une antenne à cornet rayonnante. Pour ce faire, on mesure le champ devant l'antenne à cornet point par point, longitudinalement et transversalement, avec la sonde de champ électrique. Pour déterminer la polarisation, on utilise une grille de polarisation rotative à barreaux métalliques fins dans laquelle le champ électrique ne peut se former que perpendiculairement aux barreaux. La grille de polarisation se trouve entre l'antenne à cornet et la sonde de champ électrique. L'expérience montre que le vecteur de champ électrique des micro-ondes émises est perpendiculaire au côté large de l'antenne à cornet.

L'objet de l'expérience P3.7.4.2 est l'absorption des micro-ondes. En admettant que la réflexion peut être négligée, on calcule l'absorption dans différents matériaux à partir de l'intensité incidente et de l'intensité transmise. Il apparaît alors que les micro-ondes sont très fortement absorbées par l'eau, d'où l'application pratique importante dans les cuisines modernes.

Dans l'expérience P3.7.4.3 on produit des micro-ondes stationnaires par réflexion sur une plaque métallique. L'intensité mesurée à un point fixe entre l'antenne à cornet et la plaque métallique change lorsque l'on déplace la plaque métallique dans le sens de la longueur. Dans ce cas, l'écart entre deux maxima d'intensité correspond à une demi longueur d'onde. On réduit la longueur d'onde en plaçant un diélectrique dans la marche des rayons.

Les expériences P3.7.4.4 et P3.7.4.5 montrent qu'on peut comparer de nombreuses propriétés des micro-ondes avec celles de la lumière visible. D'une part, on étudie la diffraction de micro-ondes par une arête, une fente simple, une fente double et un obstacle, d'autre part, on met en évidence la réfraction de micro-ondes et on vérifie si la loi de la réfraction de Snellius est valable.

Dans l'expérience P3.7.4.6, on étudie la réflexion totale de micro-ondes sur un milieu optiquement assez fin. La mécanique des ondes dit que l'onde réfléchie pénètre le milieu optiquement plus fin sur 3 ou 4 longueurs d'ondes pour se propager le long de la surface limite en tant qu'onde de surface. Ceci peut être vérifié expérimentalement en observant la diminution de l'intensité réfléchie si l'on place un absorbant (la main par exemple) du côté du milieu optiquement assez fin à proximité de la surface limite.

PROPAGATION DES MICRO-ONDES LE LONG DES LIGNES

P3.7.5.1

Propagation de micro-ondes le long d'une ligne de Lécher

P3.7.5.2

Mise en évidence qualitative de la propagation de micro-ondes dans un guide d'ondes métallique flexible



Propagation de micro-ondes le long d'une ligne de Lécher (P3.7.5.1)

N° de cat.	Désignation	P3.7.5.1	P3.7.5.2
737 01	Oscillateur Gunn	1	1
737 020	Alimentation Gunn avec amplificateur	1	1
737 21	Grande antenne à cornet	1	1
737 35	Sonde de champ électrique	1	1
688 809	Tige de longueur 245 mm, 10 mm Ø, avec filet M6	1	1
737 275	Physique Accessoires micro-ondes II	1	
531 120	Multimètre LDanalog 20	1	1
300 11	Socle	2	1
501 022	Câble HF, 2 m	2	2
501 461	Câbles d'expérimentation 19 A, 100 cm, noirs, paire	1	1
737 390	Absorbeurs micro-ondes, jeu	1*	
737 27	Physique Accessoires micro-ondes I		1

* complément recommandé

Pour une transmission sur de longues distances sans pertes, on peut guider des micro-ondes par un fil. Les guides d'ondes métalliques sont nettement plus répandus que la ligne de Lecher à deux fils parallèles.

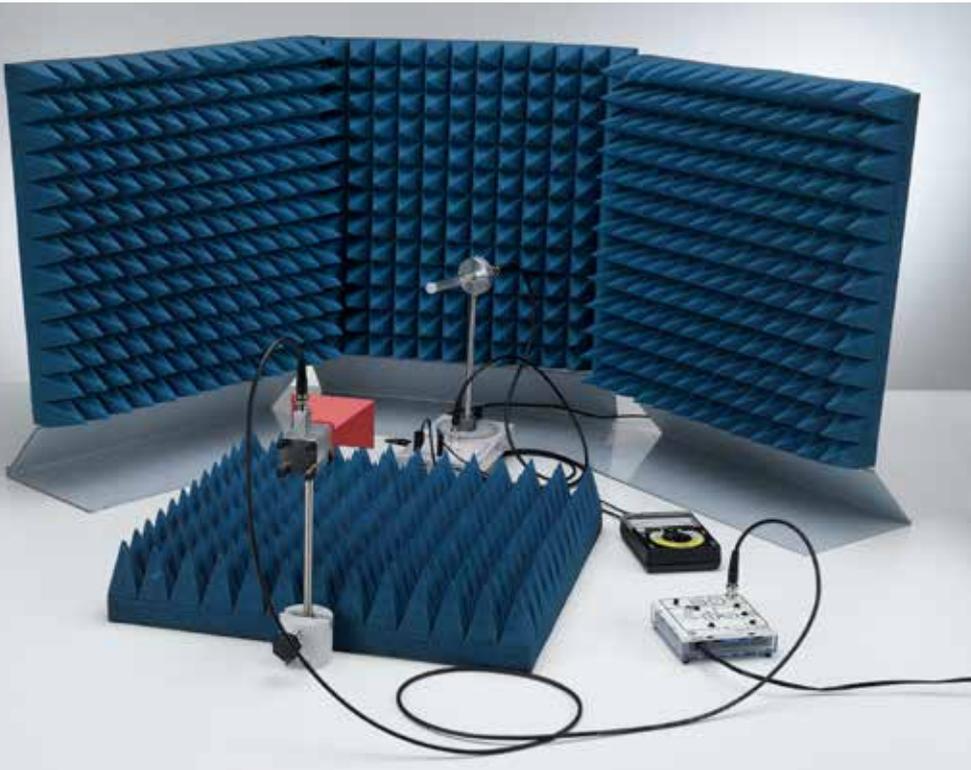
L'expérience P3.7.5.1 consiste cependant à étudier le guidage de micro-ondes le long d'une ligne de Lecher. Pour ce faire, on mesure la tension le long de la ligne à l'aide d'une sonde de champ électrique. On détermine la longueur d'onde à partir de l'écart entre les maxima.

Dans l'expérience P3.7.5.2, on étudie la propagation de micro-ondes dans un guide d'onde métallique. On vérifie d'abord avec la sonde de champ électrique que l'intensité émise à côté de l'antenne à cornet est faible. On utilise ensuite un guide d'onde métallique flexible courbé de manière à ce que les micro-ondes soient guidées vers la sonde de champ électrique et afin de mesurer une intensité supérieure.

DIRECTIVITÉ D'UNE RADIATION DE DIPÔLE

P3.7.6.1
Directivité d'une antenne hélicoïdale - tracé manuel des valeurs mesurées

P3.7.6.2
Directivité d'une antenne Yagi - tracé manuel des valeurs mesurées



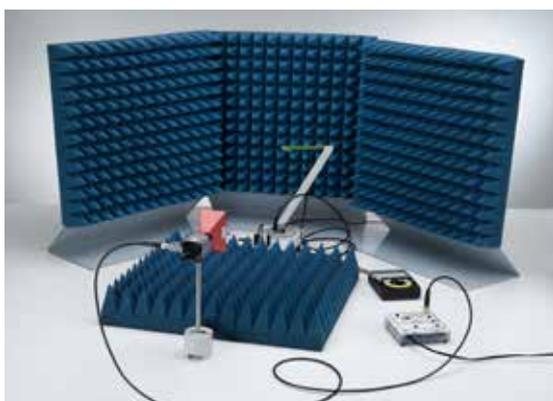
Directivité d'une antenne hélicoïdale - tracé manuel des valeurs mesurées (P3.7.6.1)

N° de cat.	Désignation	P3.7.6.1	P3.7.6.2
737 440	Jeu d'antennes hélicoïdales	1	
737 03	Détecteur coaxial	1	
737 407	Support pour antennes avec amplificateur	1	1
737 020	Alimentation Gunn avec amplificateur	1	1
737 01	Oscillateur Gunn	1	1
737 21	Grande antenne à cornet	1	1
688 809	Tige de longueur 245 mm, 10 mm Ø, avec filet M6	2	2
737 390	Absorbeurs micro-ondes, jeu	1	1
531 120	Multimètre LD analog 20	1	1
300 11	Socle	1	1
501 022	Câble HF, 2 m	1	1
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	1	1
501 461	Câbles d'expérimentation 19 A, 100 cm, noirs, paire	2	2
737 415	Kit d'antennes de fil		1

Les antennes directives émettent de l'énergie électromagnétique dans une direction spatiale préférentielle ou la reçoivent de cette direction. Toutes les antennes directives nécessitent des dimensions qui correspondent à plusieurs fois la longueur d'onde. Cette condition peut être remplie avec des moyens raisonnables dans le domaine des micro-ondes. De ce fait, les micro-ondes sont particulièrement bien adaptées aux expériences sur la directivité.

Dans l'expérience P3.7.6.1, on enregistre la directivité d'une antenne hélicoïdale. Étant donné que l'excitation se fait avec une antenne à cornet à polarisation linéaire, le sens de rotation de l'antenne hélicoïdale (circulaire à droite ou à gauche) est quelconque. Les résultats des mesures sont représentés sous forme de diagramme polaire d'après lequel on peut aisément déterminer l'effet directif de l'antenne hélicoïdale.

Dans l'expérience P3.7.6.2, on transforme une antenne dipolaire en une antenne Yagi à l'aide d'éléments passifs afin d'améliorer la propriété de directivité du montage. Quatre éléments plus courts servent de directeurs devant le dipôle, et un élément légèrement plus long sert de réflecteur derrière le dipôle. On détermine le facteur de directivité du montage à partir du diagramme polaire.



Caractéristique directionnelle d'une antenne Yagi - Enregistrement manuel des valeurs mesurées (P3.7.6.2).

ELECTRICITÉ

PORTEURS DE CHARGE EN MOUVEMENT DANS LE VIDE

TUBE À CROIX DE MALTE

P3.8.3.1

Démonstration de la propagation rectiligne des électrons dans un espace sans champ

P3.8.3.2

Déviations des électrons dans un champ magnétique axial



Déviations des électrons dans un champ magnétique axial (P3.8.3.2)

N° de cat.	Désignation	P3.8.3.1	P3.8.3.2
555 620	Tube à croix de Malte	1	1
555 600	Support pour tubes	1	1
521 70	Alimentation haute tension 10 kV	1	1
510 48	Aimants, 35 mm Ø, paire	1	
500 611	Câble de connexion de sécurité, 25 cm, rouge	1	1
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	1	2
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	1	2
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1	2
500 644	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, noir	2	2
555 604	Paire de bobines de Helmholtz		1
521 546	Alimentation CC 0...16 V/0...5 A		1
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu		1

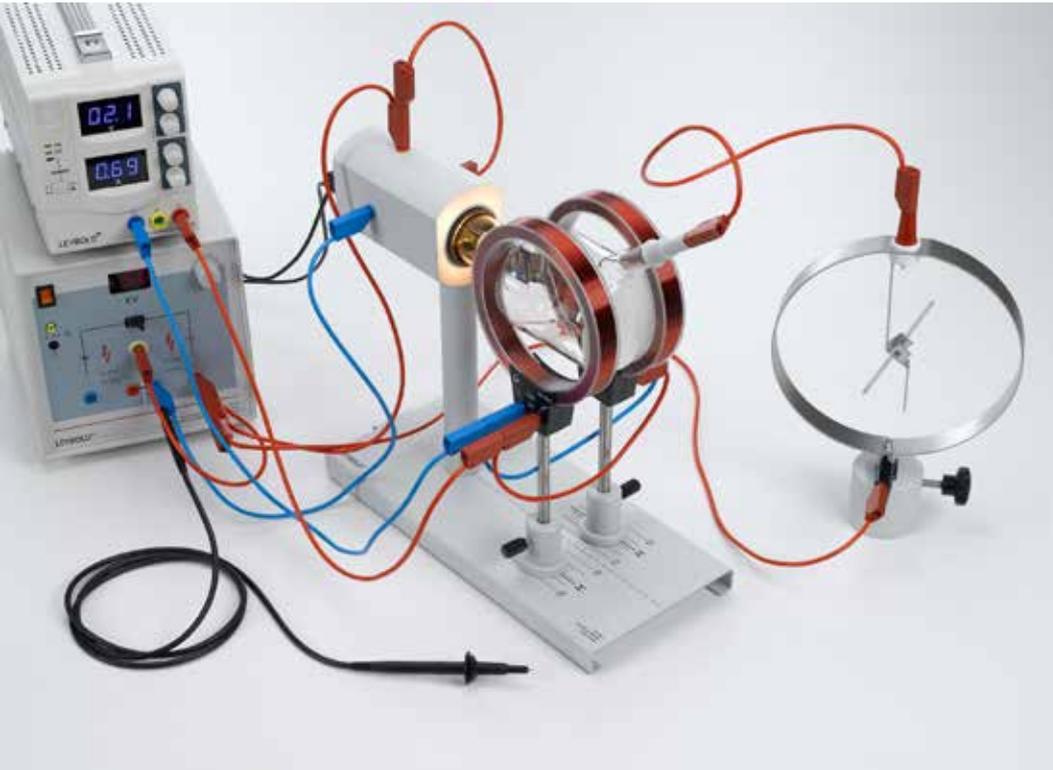
Le tube à croix de Malte consiste à accélérer des électrons de l'anode vers un écran luminescent pour les observer en tant que phénomène lumineux. Une croix de Malte dont l'ombre est visible sur l'écran luminescent, se trouve entre l'anode et l'écran luminescent. La croix de Malte peut être amenée au potentiel désiré au moyen d'une alimentation séparée.

L'expérience P3.8.3.1 consiste à mettre en évidence la propagation rectiligne des électrons dans un espace sans champ. Pour ce faire, on amène la croix de Malte au potentiel de l'anode, et on compare l'ombre de la croix dans le faisceau d'électrons avec son ombre dans la lumière. La coïncidence observée entre les deux ombres permet de conclure que la propagation des électrons est rectiligne. La croix de Malte ne possède pas de potentiel par la suite. Les charges spatiales produites créent un potentiel répulsif autour de la croix de Malte de manière à agrandir l'image sur l'écran luminescent.

L'expérience P3.8.3.2 consiste à utiliser un électroaimant pour produire un champ magnétique axial. La croix de Malte se tourne et diminue en fonction du courant de la bobine. Si l'on choisit un rapport approprié entre la haute tension et le courant de la bobine, la croix est quasiment focalisée de manière ponctuelle. Si le courant est encore augmenté, la croix grandit à nouveau. L'explication de cette focalisation magnétique réside dans le fait que les électrons ont une trajectoire spiralee dans le champ magnétique.



Croix de Malte sur l'écran luminescent (P3.8.3.1).



TUBE DE PERRIN

P3.8.4.1

Thermoémission dans le vide: détermination de la polarité et évaluation de la charge spécifique des porteurs de charge émis

Thermoémission dans le vide: détermination de la polarité et évaluation de la charge spécifique des porteurs de charge émis (P3.8.4.1)

N° de cat.	Désignation	P3.8.4.1
555 622	Tube de Jean Perrin	1
555 600	Support pour tubes	1
555 604	Paire de bobines de Helmholtz	1
521 70	Alimentation haute tension 10 kV	1
521 546	Alimentation CC 0...16 V/0...5 A	1
540 091	Électroscope	1
300 11	Socle	1
501 051	Câble haute tension, 1,5 m	1
500 611	Câble de connexion de sécurité, 25 cm, rouge	1
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	2
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	1
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	4
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	2
500 644	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, noir	2

Le tube de Perrin consiste à accélérer les électrons sur un écran lumineux à travers une anode avec diaphragme. Des plaques pour la déviation électrique horizontale du faisceau d'électrons sont placées à la sortie du diaphragme. Une cage de Faraday disposée de manière à faire un angle de 45° avec le faisceau d'électrons, peut être chargée en déviant des électrons vers le haut. Une connexion séparée permet de mesurer le courant de charge.

Dans l'expérience P3.8.4.1, on règle le courant avec une paire de bobines de Helmholtz, de manière à ce que le faisceau d'électrons dans la cage de Faraday atteigne le tube de Perrin. La cage de Faraday est reliée à un électroscope chargé au préalable et de polarité connue. La direction de la déviation à l'arrivée du faisceau d'électrons détermine le signe de la charge des électrons. En même temps, on peut évaluer la charge spécifique des électrons. On a

$$\frac{e}{m} = \frac{2U_A}{(B \cdot r)^2} \quad U_A : \text{tension } \mp \text{ l'anode}$$

Le rayon de courbure r de la trajectoire circulaire est spécifié par la géométrie du tube. On calcule le champ magnétique B à partir du courant I qui traverse les bobines de Helmholtz.

ELECTRICITÉ

PORTEURS DE CHARGE EN MOUVEMENT DANS LE VIDE

TUBE DE THOMSON

P3.8.5.1

Étude de la déviation des électrons dans des champs électriques et magnétiques

P3.8.5.2

Montage d'un filtre de vitesses (filtre de Wien) pour la détermination de la charge électrique spécifique



Étude de la déviation des électrons dans des champs électriques et magnétiques (P3.8.5.1)

N° de cat.	Désignation	P3.8.5.1-2
555 624	Déflexion	1
555 600	Support pour tubes	1
555 604	Paire de bobines de Helmholtz	1
521 70	Alimentation haute tension 10 kV	2
521 546	Alimentation CC 0...16 V/0...5 A	1
500 611	Câble de connexion de sécurité, 25 cm, rouge	2
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	1
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	1
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	2
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	4
500 644	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, noir	2

Dans le tube de Thomson, les électrons passent à travers un diaphragme à fente derrière l'anode et arrivent sur un écran lumineux placé en biais dans la marche des rayons en l'effleurant. L'allure du faisceau d'électrons devient visible sur l'écran. Un condensateur à plaques est placé à la sortie du diaphragme à fente, permettant de dévier verticalement le faisceau d'électrons de manière électrostatique. Par ailleurs, on peut créer un champ magnétique externe avec des bobines de Helmholtz, permettant également de dévier le faisceau d'électrons.

L'expérience P3.8.5.1 consiste à étudier la déviation des électrons dans des champs électriques et magnétiques. Pour différentes tensions à l'anode U_A , d'une part on observe l'allure du faisceau d'électrons lorsqu'on varie la tension de déviation U_p au niveau du condensateur à plaques, d'autre part, on dévie les électrons dans le champ magnétique des bobines de Helmholtz en variant le courant de la bobine I . Le point où le faisceau d'électrons sort de l'écran lumineux donne le rayon r de la trajectoire. L'application de la tension d'anode fournit une valeur expérimentale pour la charge spécifique des électrons

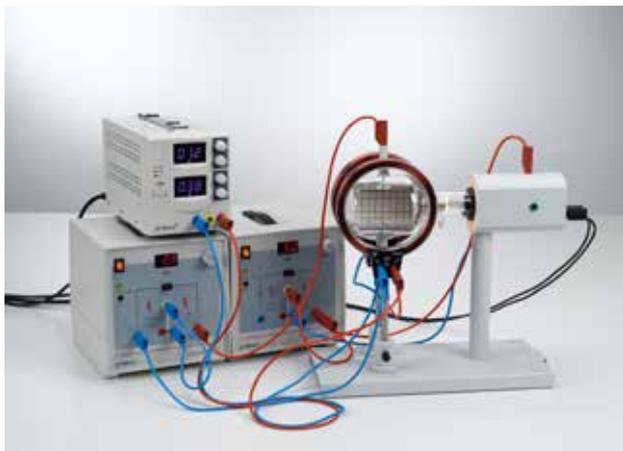
$$\frac{e}{m} = \frac{2U_A}{(B \cdot r)^2}$$

avec le champ magnétique B calculé à partir du courant I .

Dans l'expérience P3.8.5.2, on monte un filtre de vitesses (filtre de Wien) avec un champ électrique et un champ magnétique croisés, ce qui permet entre autres de déterminer la charge spécifique des électrons de manière plus précise. Si pour une tension à l'anode U_A fixe, on règle le courant I des bobines de Helmholtz et la tension de déviation U_p de manière à ce que les effets du champ magnétique et du champ électrique se compensent, le faisceau est quasiment rectiligne et on a :

$$\frac{e}{m} = \frac{1}{2U_A} \cdot \left(\frac{U_p}{B \cdot d} \right)^2$$

d : distance entre les plaques du condensateur



Assembler un filtre de vélocité (filtre de Wien) pour déterminer la charge spécifique des électrons (P3.8.5.2).

DÉCHARGE GAZEUSE À FAIBLE PRESSION

P3.9.2.1
Étude de la décharge gazeuse autonome dans l'air en fonction de la pression



Étude de la décharge gazeuse autonome dans l'air en fonction de la pression (P3.9.2.1)

N° de cat.	Désignation	P3.9.2.1
554 161	Tube à décharge, rayons canaux	1
378 752	Pompe à vide à palettes D 2,5 E	1
378 023	Rodage mâle RN 19/26, DN 16 KF	1
378 015	Élément en croix DN 16 KF	1
378 050	Anneau de serrage DN 10/16 KF	5
378 045	Anneau de centrage DN 16 KF	5
378 777	Robinet à boisseau sphérique pour le vide poussé DN 16 KF	1
378 776	Vanne de dosage DN 16 KF	1
378 5131	Vacuomètre de Pirani avec affichage	1
378 701	Graisse Leybold pour vide poussé	1
521 70	Alimentation haute tension 10 kV	1
501 051	Câble haute tension, 1,5 m	2
378 764	Filtre d'échappement AF 8	1*

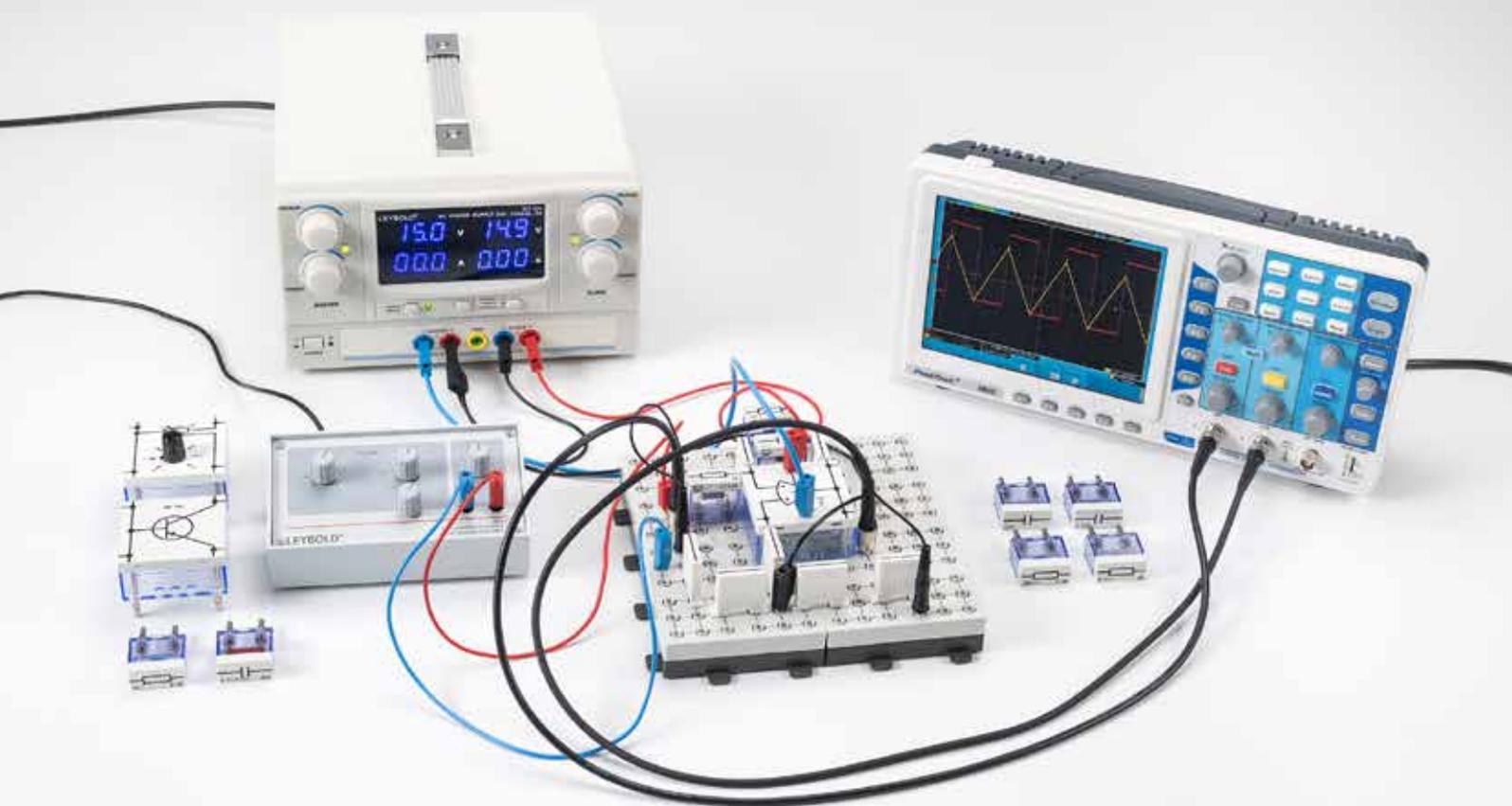
* complément recommandé

La décharge luminescente est une forme particulière de la décharge gazeuse. Elle brûle de manière autonome à de petites pressions et avec une densité de courant relativement faible. Elle est liée à des phénomènes lumineux très nets. L'étude de ces phénomènes a apporté des connaissances fondamentales sur la structure des atomes.

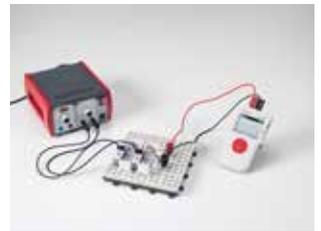
Dans l'expérience P3.9.2.1, on relie un tube de verre cylindrique à une pompe à vide afin de le vider doucement. On applique une haute tension aux électrodes du tube en verre disposées frontalement. Il ne se produit aucune décharge à pression normale. Ce n'est qu'à pression diminuée qu'il y a apparition d'un courant lié à un phénomène lumineux. Après réduction supplémentaire de la tension de gaz, on observe plusieurs phases: un fil lumineux s'étend d'abord de l'anode vers la cathode. Une colonne lumineuse issue de l'anode remplit ensuite la quasi totalité de l'espace. Une couche lumineuse se trouve au dessus de la cathode. La colonne se raccourcit et se décompose en plusieurs couches. L'apparition de ces couches est due au fait que les électrons excitateurs doivent traverser une zone d'accélération après excitation par choc, afin d'avoir suffisamment d'énergie pour exciter les atomes une nouvelle fois. Le libre parcours est donc mis en évidence par la distance entre les couches.

P4.2.2.5 Différentiateur et intégrateur

Pour plus d'informations sur cette expérience, rendez-vous à la page 138.

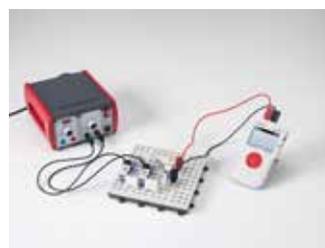
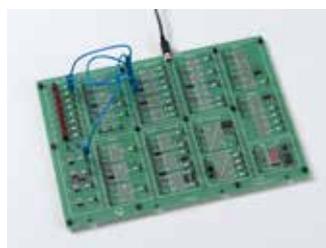


P4 ELECTRONIQUE



P4.1	COMPOSANTS, CIRCUITS DE BASE	130
P4.2	AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL	138
P4.5	ELECTRONIQUE NUMÉRIQUE	139

P4 ELECTRONIQUE



P4.1 COMPOSANTS, CIRCUITS DE BASE

P4.1.1	Sources de courant et de tension	131
P4.1.2	Résistances particulières	132
P4.1.3	Diodes	133
P4.1.4	Montages avec des diodes	134
P4.1.5	Transistors	135
P4.1.6	Montages avec des transistors	136
P4.1.7	Optoélectronique	137

P4.2 AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL

P4.2.2	Montages avec des amplificateurs opérationnels	138
--------	--	-----

P4.5 ELECTRONIQUE NUMÉRIQUE

P4.5.1	Enchaînements simples	139
P4.5.2	Les circuits logiques	140
P4.5.3	Écritures / sorties analogiques	141

SOURCES DE COURANT
ET DE TENSION

P4.1.1.1
Détermination de la résistance interne
d'une batterie

P4.1.1.3
Relevé des caractéristiques courant
/ tension d'une batterie solaire en
fonction de l'intensité lumineuse



Relevé des caractéristiques courant / tension d'une batterie solaire en fonction de l'intensité lumineuse (P4.1.1.3)

N° de cat.	Désignation	P4.1.1.1	P4.1.1.3
576 86	Porte-pile Mono STE 2/50	1	
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité , 20/10	1	3
685 48	Pile 1,5 V (Mono)	1	
531 120	Multimètre LD analog 20	2	2
537 32	Rhéostat à curseur 10 ohms	1	
500 614	Câble de connexion de sécurité 25 cm, noir	5	
578 63	Panneau solaire 2 V/0,3 A, STE 4/100		1
577 90	Potentiomètre 220 Ohms, STE 4/50		1
501 48	Cavalier STE 2/19, jeu de 10		1
450 641	Lampe halogène 12 V, 50/100W		1
450 63	Ampoule halogène 12 V/100 W, G6,35		1
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A		1
300 01	Pied en V, grand		1
300 43	Tige 75 cm, 12 mm Ø		1
301 01	Noix Leybold		1
500 98	Douilles d'adaptation de sécurité, noires (6)		1
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge		2
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu		2
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir		2

La tension U_0 produite dans une source de tension se distingue généralement de la tension aux bornes U mesurée aux bornes d'un appareil branché, dès qu'un courant I est prélevé à la source de tension. Par conséquent, une résistance R_i à laquelle une partie de la tension produite est perdue doit agir à la source de tension. Cette résistance est la résistance interne de la source de tension.

Une cellule solaire est une cellule photovoltaïque à la jonction pn de laquelle l'énergie de rayonnement est directement transformée en énergie électrique. On monte souvent plusieurs cellules solaires ensemble afin d'obtenir une pile solaire.

Au cours de l'expérience P4.1.1.1, on branche à une pile un rhéostat à curseur comme charge ohmique, pour déterminer la résistance interne. On mesure la tension aux bornes U de la pile pour différentes charges puis on l'applique en fonction du courant I dans le rhéostat à curseur. La résistance interne R_i est déterminée selon

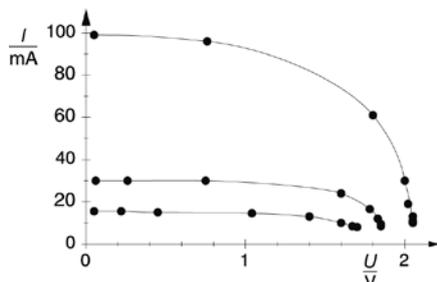
$$U = U_0 - R_i \cdot I$$

par régression linéaire sur les valeurs mesurées. Un second diagramme représente la puissance

$$P = U \cdot I$$

en fonction de la résistance de charge. La puissance est maximale lorsque la résistance de charge prend la valeur de la résistance interne R_i .

Au cours de l'expérience P4.1.1.3, on trace les caractéristiques courant-tension d'une pile solaire pour différents éclairages. Pour varier l'éclairage, on change la distance de la source lumineuse. Les caractéristiques montrent un comportement typique: pour une petite résistance de charge, la pile solaire fournit un courant presque constant. Si une tension critique dépendant de l'éclairage est dépassée, la pile solaire fonctionne de plus en plus comme une source de tension constante.



Caractéristiques courant-tension d'une pile solaire pour différents éclairages (P4.1.1.3)

RÉSISTANCES PARTICULIÈRES

P4.1.2.1
Relevé de la caractéristique courant / tension d'une lampe à incandescence

P4.1.2.2
Relevé de la caractéristique courant / tension d'un varistor

P4.1.2.3
Mesure des résistances CTP et CTN en fonction de la température

P4.1.2.4
Mesure de photorésistances en fonction de la luminosité



Relevé de la caractéristique courant / tension d'une lampe à incandescence (P4.1.2.1)

N° de cat.	Désignation	P4.1.2.1	P4.1.2.2	P4.1.2.3	P4.1.2.4
505 08	Ampoules 12 V/3 W, E10, jeu de 10	1			
579 06	Douille pour lampe, en haut, STE 2/19	1			
524 011USB	Power-CASSY USB	1			
524 220	CASSY Lab 2	1			
578 00	Varistance VDR STE 2/19		1		
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité , 20/10		1	1	
521 546	Alimentation CC 0...16 V/0...5 A		1	1	1
531 120	Multimètre LDanalag 20		2	2	1
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge		2	2	
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu		2	2	
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu		1	1	
578 06	Sonde à thermistance CTP 30 ohms, STE 2/19			1	
578 04	Sonde à thermistance CTN 4,7 kohms, STE 2/19			1	
666 767	Plaque chauffante, 1500 W, 185 mm Ø			1	
382 34	Thermomètre, -10...+110 °C/0,2 K			1	
664 104	Bécher DURAN, 400 ml, forme basse			1	
578 02	Photorésistance LDR 05, STE 2/19				1
579 05	Douille pour lampe E10, latéral, STE 2/19				1
505 131	Ampoules 6 V/5 W, E10, jeu de 10				1
460 21	Support pour éléments enfichables			2	
521 210	Transformateur 6/12 V, 30 W				1
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m				1
460 312	Cavalier avec noix 45/35			2	
501 45	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, rouge/bleu, paire			2	
500 422	Câble de connexion 19 A, 50 cm, bleu				1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1			

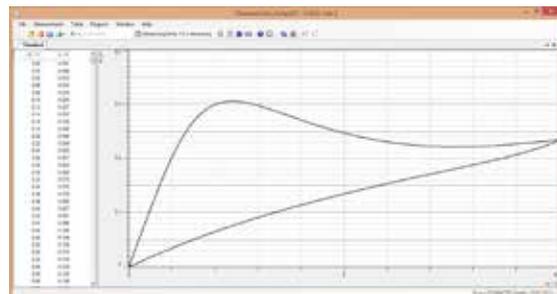
Dans beaucoup de matériaux, tension et courant n'évoluent pas proportionnellement l'un à l'autre. Leur résistance dépend de l'intensité du courant. Dans les applications techniques, le rôle des éléments dont la résistance dépend fortement de la température, de l'éclairage lumineux ou d'autres grandeurs physiques est de plus en plus important.

Au cours de l'expérience P4.1.2.1, on utilise le système CASSY pour relever la caractéristique courant-tension d'une lampe à incandescence. Comme le filament s'échauffe par apport de courant et comme sa résistance dépend de la température, on obtient deux caractéristiques différentes à l'enclenchement et à la coupure du courant. De plus, la caractéristique dépend de la vitesse d'accroissement dU/dT de la tension.

Dans l'expérience P4.1.2.2, on trace la caractéristique courant-tension d'une varistance (VDR résistance de dépendant de la tension). Dans ce domaine de fonctionnement, la caractéristique n'est pas linéaire. Pour des courants assez importants, elle passe dans ledit domaine d'accroissement dans lequel la part ohmique augmente sur l'ensemble de la résistance.

Dans l'expérience P4.1.2.3, on mesure les caractéristiques de température de deux thermistors: une résistance CTN et une résistance CTP. Les valeurs mesurées sont toujours décrites par des équations empiriques dans lesquelles apparaissent simplement la valeur nominale R_0 , la température de référence T_0 ainsi qu'une constante du matériau comme paramètres.

La caractéristique d'une photorésistance (LDR résistance de dépendant de la lumière) CdS fait l'objet de l'expérience P4.1.2.4 : sa résistance varie suivant la luminosité entre environ 100Ω et $10 M\Omega$. On mesure la résistance en fonction de l'écartement d'une lampe à incandescence qui éclaire la photorésistance.



Caractéristique courant-tension de l'ampoule électrique (P4.1.2.1).

DIODES

- P4.1.3.1
Tracé de caractéristiques courant / tension de diodes
- P4.1.3.2
Tracé de caractéristiques courant / tension de diodes Zener
- P4.1.3.3
Tracé de caractéristiques courant / tension de diodes électroluminescentes (LED)
- P4.1.3.4
Tracé de caractéristiques courant / tension de diodes avec CASSY
- P4.1.3.5
Tracé de caractéristiques courant / tension de diodes Zener avec CASSY
- P4.1.3.6
Tracé de caractéristiques courant / tension de diodes électroluminescentes (LED) avec CASSY



Tracé de caractéristiques courant / tension de diodes électroluminescentes (LED) (P4.1.3.3)

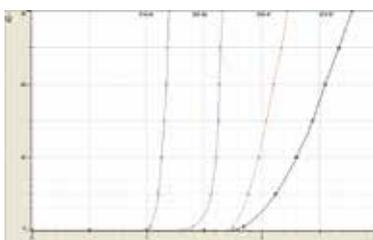
N° de cat.	Désignation	P4.1.3.1	P4.1.3.2	P4.1.3.3	P4.1.3.4	P4.1.3.5	P4.1.3.6
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité , 20/10	1	1	1	1	1	1
578 51	Diode 1N 4007, STE 2/19	1			1		
578 50	Diode AA 118, germanium, STE 2/19	1			1		
577 32	Résistance 100 Ohms, STE 2/19	1	1	1	1	1	1
521 487	Alimentation CA/CC PRO 0...12 V/3 A	1	1	1			
531 120	Multimètre LDanalog 20	2	2	2			
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	2	2	2	2	2	2
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	2	2	2	2	2	2
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1	1	1			
578 55	Diode Zener 6,2, STE 2/19		1			1	
578 54	Diode Zener 9,1, STE 2/19		1			1	
578 57	Diode électroluminescente verte, STE 2/19			1			1
578 47	Diode électroluminescente jaune, STE 2/19			1			1
578 48	Diode électroluminescente rouge, STE 2/19			1			1
578 49	Diode infrarouge, émission latérale, STE 2/19			1			1
524 013	Sensor-CASSY 2				1	1	1
524 220	CASSY Lab 2				1	1	1
500 644	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, noir				1	1	1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)				1	1	1

La technique de montage électronique est déterminée dans presque tous les cas par les composants semi-conducteurs. Les diodes semi-conductrices comptent parmi les composants les plus simples. Elles contiennent un cristal semi-conducteur dans lequel une zone conductrice n limite une zone conductrice p, et vice-versa. Une zone de conductivité plus faible apparaît à la surface limite lors de la recombinaison des porteurs de charge c.-à-d. des électrons sur la zone conductrice n et des trous sur la zone conductrice p. Cette zone s'agrandit lorsqu'un champ électrique extérieur extrait les électrons ou les trous de la surface limite. On dit que la direction du champ magnétique est le sens bloquant. Avec un champ électrique inversé, les électrons ou les trous sont refloués dans la surface limite et facilitent le passage du courant à travers la diode.

Dans l'expérience P4.1.3.1 et P4.1.3.4, on mesure puis on trace manuellement point par point la caractéristique d'une diode Si puis celle d'une diode Ge. On compare le courant dans le sens bloquant et la tension de seuil des deux diodes, ces données étant les plus importantes.

La caractéristique courant-tension d'une diode Zener fait l'objet de l'expérience P4.1.3.2 et P4.1.3.5. Il faut dans ce cas faire particulièrement attention à la tension d'avalanche dans le sens bloquant à partir de laquelle le courant augmente de façon cumulative. Le courant est ramené sur les porteurs de charge dans la couche d'appauvrissement, qui, accélérés par la tension appliquée, ionisent par chocs d'autres atomes du semi-conducteur.

Dans l'expérience P4.1.3.3 et P4.1.3.6, on compare les caractéristiques de diodes électroluminescentes infrarouge, rouge, jaune et verte.



Tracé de caractéristiques courant / tension de diodes électroluminescentes (LED) (P4.1.3.3)

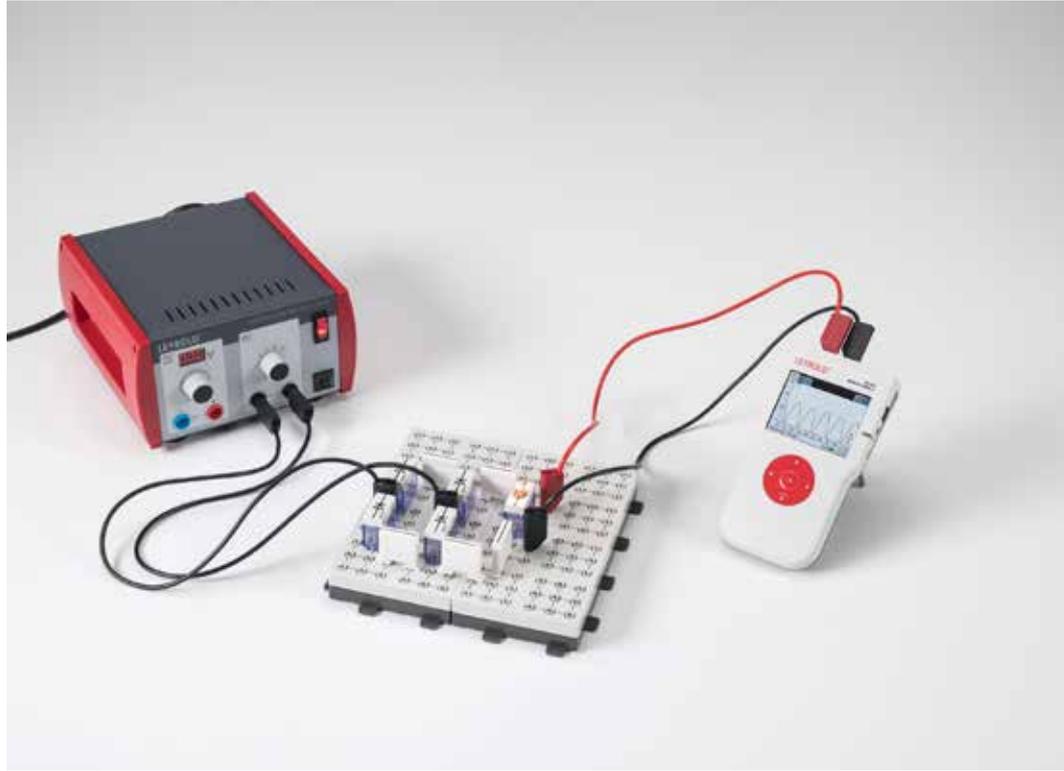
**MONTAGES AVEC
DES DIODES**

P4.1.4.1
Redressement d'une tension alternative
avec des diodes

P4.1.4.2
Limite de tension à l'aide d'une diode
Zener

P4.1.4.3
Vérification de la polarité de diodes
électroluminescentes

P4.1.4.4
Redressement d'une tension alternative
avec des diodes avec CASSY



Redressement d'une tension alternative avec des diodes avec CASSY (P4.1.4.4)

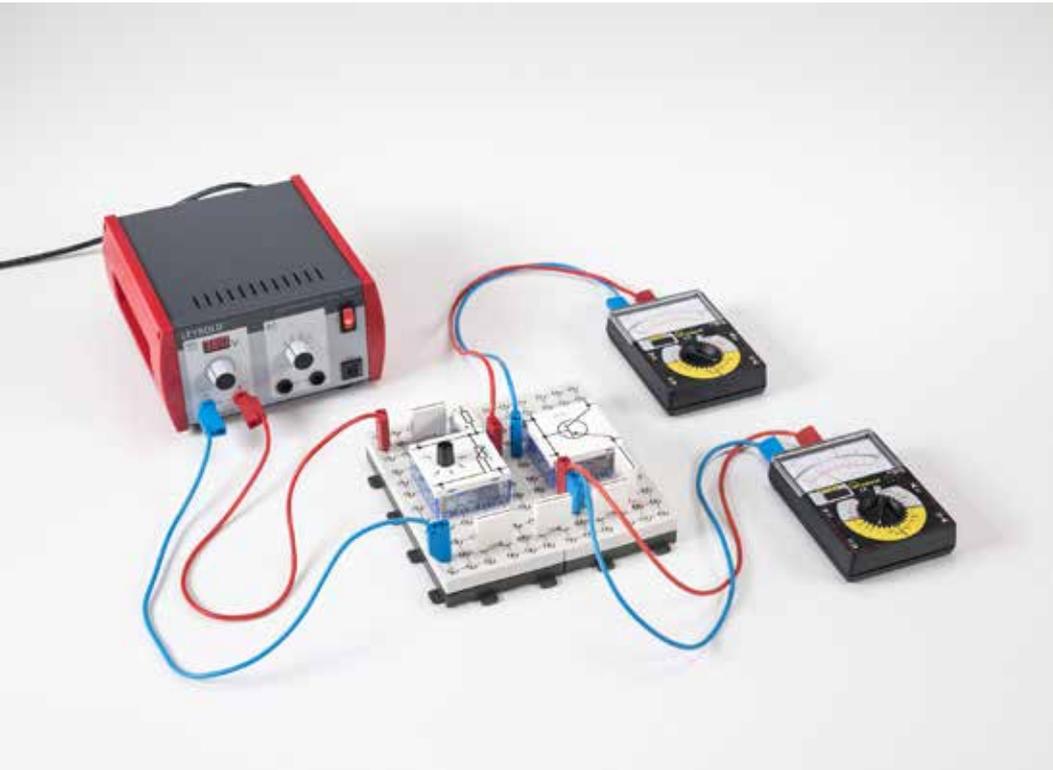
N° de cat.	Désignation	P4.1.4.1	P4.1.4.2	P4.1.4.3	P4.1.4.4
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité , 20/10	2	1	1	2
578 51	Diode 1N 4007, STE 2/19	4			4
579 06	Douille pour lampe, en haut, STE 2/19	1	1		1
505 08	Ampoules 12 V/3 W, E10, jeu de 10	1	1		1
501 48	Cavalier STE 2/19, jeu de 10	1			1
521 487	Alimentation CA/CC PRO 0...12 V/3 A	1	1	1	1
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1			
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	1			
531 120	Multimètre LDanalog 20	1	2	2	
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	1	3	3	1
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	1	3	3	
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir	2			3
578 55	Diode Zener 6,2, STE 2/19		1		
577 42	Résistance 680 ohms, STE 2/19		1	1	
578 57	Diode électroluminescente verte, STE 2/19			1	
578 48	Diode électroluminescente rouge, STE 2/19			1	
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN				1

Diodes, diodes Zener et diodes électroluminescentes constituent à présent des éléments essentiels de presque tous les circuits électroniques.

Dans l'expérience P4.1.4.1 et P4.1.4.4, on étudie le mode de fonctionnement d'un redresseur demi-onde et d'un redresseur pleine-onde lors du redressement d'une tension alternative: le redresseur demi-onde constitué par une diode bloque pour une polarisation appropriée de la diode chaque première demi-onde de la tension alternative et ne laisse passer qu'une demi-onde sur deux. Le redresseur pleine-onde formé par quatre diodes montées en pont exploite au contraire les deux demi-ondes de la tension alternative.

Dans l'expérience P4.1.4.2, on démontre l'utilisation d'une diode Zener comme protection contre les surtensions. Tant que la tension appliquée reste inférieure à la tension d'avalanche U_Z de la diode Zener, cette dernière agit comme un isolant et la tension U reste non influencée. Avec des tensions supérieures à U_Z , le courant qui circule dans la diode est si fort que U se limite à U_Z .

Le but de l'expérience P4.1.4.3 est de réaliser un circuit pour vérifier la polarité de la tension avec une diode électroluminescente verte et une diode électroluminescente rouge. Le circuit est testé avec une tension continue puis avec une tension alternative.



TRANSISTORS

P4.1.5.1
Etudes des propriétés de diodes des jonctions d'un transistor

P4.1.5.2
Tracé des caractéristiques d'un transistor

P4.1.5.3
Tracé des caractéristiques d'un transistor à effet de champ

P4.1.5.4
Tracé des caractéristiques d'un transistor avec CASSY

P4.1.5.5
Tracé des caractéristiques d'un transistor à effet de champ avec CASSY

Tracé des caractéristiques d'un transistor (P4.1.5.2)

N° de cat.	Désignation	P4.1.5.1	P4.1.5.2	P4.1.5.3	P4.1.5.4	P4.1.5.5
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité , 20/10	1	2	3	1	1
578 67	Transistor BD 137, NPN, ém. bas, STE 4/50	1	1		1	
578 68	Transistor BD 138, PNP, ém. bas, STE 4/50	1				
577 32	Résistance 100 Ohms, STE 2/19	1		1		
521 487	Alimentation CA/CC PRO 0...12 V/3 A	1	1	1		
531 120	Multimètre LDanalog 20	2	3	2		
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	2	4	3	1	3
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	3	4	3	2	3
577 44	Résistance 1 kOhm, STE 2/19		1	1		
577 64	Résistance 47 kohms, STE 2/19		1	1		
577 90	Potentiomètre 220 Ohms, STE 4/50		1	1		
577 92	Potentiomètre 1 kohm, STE 4/50		1	1		
501 48	Cavalier STE 2/19, jeu de 10		1	2		
578 51	Diode 1N 4007, STE 2/19			1		
521 210	Transformateur 6/12 V, 30 W			1		
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265			1		
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm			2		
577 56	Résistance 10 kOhms, STE 2/19				1	1
578 31	Condensateur 0,1 µF, STE 2/19				1	1
524 013	Sensor-CASSY 2				1	1
524 011USB	Power-CASSY USB				1	1
524 220	CASSY Lab 2				1	1
500 611	Câble de connexion de sécurité, 25 cm, rouge				1	
500 612	Câble de connexion de sécurité, 25 cm, bleu				1	
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)				1	1

Les transistors comptent parmi les composants semi-conducteurs les plus importants utilisés dans les circuits électroniques. On distingue les transistors bipolaires dans lesquels électrons et trous prennent simultanément part à la conduction du courant et les transistors à effet de champ dans lesquels le courant est transporté par les électrons. Les électrodes du transistor bipolaire s'appellent émetteur, base et collecteur. Il est composé dans l'ensemble de trois couches conductrices n ou p se succédant dans l'ordre npn ou pnp. La couche placée au milieu, la base, est si fine que les porteurs de charge quittant une transition peuvent atteindre l'autre. Dans un transistor à effet de champ, la conductivité du canal conducteur de courant est modifiée sans puissance au moyen d'un champ électrique. Ce champ est généré par la dite grille (gate). L'électrode d'entrée du transistor à effet de champ s'appelle la source, l'électrode de sortie le drain.

L'objet de l'expérience P4.1.5.1 est le montage de principe du transistor bipolaire puis sa comparaison avec une diode. A cette occasion, on étudie explicitement la différence entre transistor npn et pnp.

Dans l'expérience P4.1.5.2 et P4.1.5.4, on étudie les propriétés d'un transistor npn à l'appui de ses caractéristiques. On mesure la caractéristique d'entrée, c.-à-d. le courant de base I_B en fonction de la tension base-émetteur U_{BE} , la caractéristique de sortie, c.-à-d. le courant de collecteur I_C en fonction de la tension collecteur-émetteur U_{CE} pour un courant de base I_B constant ainsi que la caractéristique de commande, c.-à-d. le courant de collecteur I_C en fonction du courant de base I_B et pour une tension collecteur-émetteur U_{CE} constante.

Au cours de l'expérience P4.1.5.3 et P4.1.5.5, on mesure puis on trace la caractéristique d'un transistor à effet de champ, c.-à-d. le courant de drain I_D en fonction de la tension U_{DS} entre drain et source pour une tension de grille U_G constante.

**MONTAGES AVEC
DES TRANSISTORS**

P4.1.6.1
Transistor en tant qu'amplificateur

P4.1.6.2
Transistor en tant que commutateur

P4.1.6.3
Transistor en tant que générateur
d'ondes sinusoïdales (oscillateur)

P4.1.6.4
Transistor en tant que générateur de
fonctions

P4.1.6.5
Transistor à effet de champ en tant
qu'amplificateur

P4.1.6.6
Transistor à effet de champ en tant que
commutateur



Transistor à effet de champ en tant que commutateur (P4.1.6.6)

N° de cat.	Désignation	P4.1.6.1	P4.1.6.2	P4.1.6.3	P4.1.6.4	P4.1.6.5	P4.1.6.6
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité , 20/10	3	2	3	3	3	2
578 67	Transistor BD 137, NPN, ém. bas, STE 4/50	1	1				
577 44	Résistance 1 kOhm, STE 2/19	1	1	2			
577 56	Résistance 10 kOhms, STE 2/19	1		3		1	1
577 64	Résistance 47 kohms, STE 2/19	1		2			1
577 80	Rhéostat 10 kohms, STE 2/19	1	1				
577 82	Résistance variable 47 kOhms, STE 2/19	1					
578 38	Condensateur électrolytique 47 µF, STE 2/19	1				1	
578 39	Condensateur électrolytique 100 µF, STE 2/19	1					
578 40	Condensateur électrolytique 470 µF, STE 2/19	1			1		
501 48	Cavalier STE 2/19, jeu de 10	1	1	1	1	1	1
522 621	Générateur de fonctions S 12	1				1	1
521 487	Alimentation CA/CC PRO 0...12 V/3 A	1	1	1	1	1	1
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1		1	1	1	1
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	2		2	2	2	2
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	2	3	2	1	2	3
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	2	3	3	1	2	3
578 02	Photorésistance LDR 05, STE 2/19		1				
578 06	Sonde à thermistance CTP 30 ohms, STE 2/19		1				
579 06	Douille pour lampe, en haut, STE 2/19		1		2		
505 08	Ampoules 12 V/3 W, E10, jeu de 10		1				
579 13	Interrupteur à bascule STE 2/19		1				
579 38	Élément chauffant 100 ohm, 2 W STE 2/50		1				
531 120	Multimètre LDanalog 20		2	1		1	1
578 76	Transistor BC 140, NPN, ém. bas, STE 4/50			2	2		
577 58	Résistance 15 kohms, STE 2/19			2	2	1	
577 68	Résistance 100 kohms, STE 2/19			2		1	
577 81	Rhéostat 4,7 kohms, STE 2/19			2			
578 22	Condensateur 100 pF, STE 2/19			2			
578 23	Condensateur 220 pF, STE 2/19			2			
578 35	Condensateur 1 µF, STE 2/19			2		2	

N° de cat.	Désignation	P4.1.6.1	P4.1.6.2	P4.1.6.3	P4.1.6.4	P4.1.6.5	P4.1.6.6
578 16	Condensateur 4,7 µF, STE 2/19						
577 46	Résistance 1,5 kohm, STE 2/19			2			
578 41	Condensateur électrolytique 220 µF, bipolaire, STE 2/19				1		
578 13	Condensateur 0,22 µF, STE 2/19				1		
578 33	Condensateur 0,47 µF, STE 2/19				1		
578 51	Diode 1N 4007, STE 2/19				2		
505 191	Ampoules 15 V/2 W, E10, jeu de 5				1		
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir				1	1	
577 61	Résistance 33 kohms, STE 2/19					1	
577 657	Résistance 68 kohms, STE 2/19					1	
577 76	Résistance 1 Mohm, STE 2/19					1	
578 36	Condensateur 2,2 µF, STE 2/19					1	
577 92	Potentiomètre 1 kohm, STE 4/50						1

Dans l'expérience P4.1.6.1 étudie un transistor bipolaire en circuit émetteur. Le réglage du point de fonctionnement et l'amplification en fonction de la résistance d'émetteur sont également étudiés.

Dans l'expérience P4.1.6.2, un transistor bipolaire est utilisé comme interrupteur. Pour étudier ses propriétés, le transistor est saturé à l'aide d'un courant élevé de la base.

Dans l'expérience P4.1.6.3, un générateur de sinus est construit à l'aide d'un circuit Wien- Robinson et d'un amplificateur à 2 étages. Les paramètres de fonctionnement et les propriétés du circuit sont étudiés.

Dans l'expérience P4.1.6.4, un multivibrateur astable constitué de deux transistors bipolaires est monté et les influences des composants sur la fréquence ainsi que sur le rapport cyclique des vibrations sont étudiés.

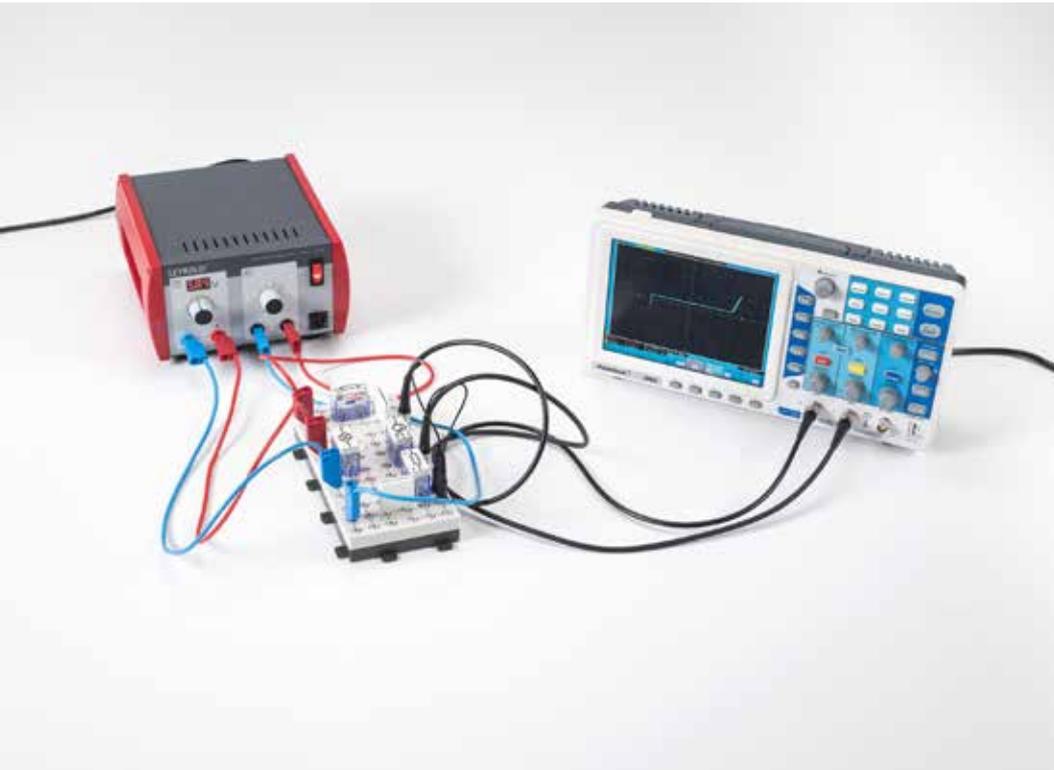
Dans l'expérience P4.1.6.5, le transistor à effet de champ comme amplificateur en mode circuit source et en mode circuit gate est étudié et les propriétés des circuits déterminées.

Dans l'expérience P4.1.6.6, le transistor à effet de champ fonctionne comme un interrupteur. La résistance à l'état passant est étudié à différentes tensions de polarisation ainsi que l'atténuation du signal lors de la commutation.

OPTOÉLECTRONIQUE

P4.1.7.1
Tracé de la caractéristique d'un phototransistor branché comme une photodiode

P4.1.7.2
Montage d'une ligne de transition optique



Tracé de la caractéristique d'un phototransistor branché comme une photodiode (P4.1.7.1)

N° de cat.	Désignation	P4.1.7.1	P4.1.7.2
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité , 20/10	1	3
578 61	Phototransistor, latéral, STE 2/19	1	1
577 32	Résistance 100 Ohms, STE 2/19	1	
577 56	Résistance 10 kOhms, STE 2/19	1	3
579 05	Douille pour lampe E10, latéral, STE 2/19	1	
505 08	Ampoules 12 V/3 W, E10, jeu de 10	1	
501 48	Cavalier STE 2/19, jeu de 10	1	1
521 487	Alimentation CA/CC PRO 0...12 V/3 A	1	
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1	
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	2	
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	2	2
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	2	2
578 57	Diode électroluminescente verte, STE 2/19		1
578 58	Diode électroluminescente rouge, émission latérale, STE 2/19		1
578 68	Transistor BD 138, PNP, ém. bas, STE 4/50		1
578 85	Amplificateur opérationnel LM 741, STE 4/50		1
577 28	Résistance 47 Ohms, STE 2/19		1
577 40	Résistance 470 Ohms, STE 2/19		1
577 44	Résistance 1 kOhm, STE 2/19		1
577 48	Résistance 2,2 kohms, STE 2/19		1
577 64	Résistance 47 kohms, STE 2/19		1
578 16	Condensateur 4,7 µF, STE 2/19		2
578 39	Condensateur électrolytique 100 µF, STE 2/19		1
578 40	Condensateur électrolytique 470 µF, STE 2/19		1
521 536	Alimentation CC 2 x 0...16 V/2 x 0...5 A		1
522 621	Générateur de fonctions S 12		1
579 29	Écouteur		1
500 98	Douilles d'adaptation de sécurité, noires (6)		1
500 614	Câble de connexion de sécurité 25 cm, noir		4
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir		1

L'optoélectronique s'occupe des applications de l'interaction entre lumière et porteurs de charges électriques dans des installations optiques et électroniques. Dans les montages optoélectroniques, il y a un élément qui émet la lumière, un qui la transmet et un qui la reçoit. La commande du rayon lumineux se fait de façon électrique.

Un phototransistor monté comme une photodiode et dont la base n'est pas connectée fait l'objet de l'expérience P4.1.7.1. On représente à l'aide d'un oscilloscope les caractéristiques courant-tension pour l'état non éclairé, l'état faiblement éclairé et l'état éclairé. Il en ressort que la caractéristique d'une diode complètement éclairée est comparable à celle d'une diode Zener, alors que pour l'état non éclairé, on observe aucun comportement d'état passant.

Dans l'expérience P4.1.7.2, on démontre la transmission optique des signaux électriques d'un générateur de fonctions vers un haut-parleur. En modifiant le courant direct, les signaux modulent l'intensité lumineuse d'une diode électroluminescente dont la lumière est conduite à la base d'un phototransistor par une fibre optique flexible. Le phototransistor est monté en série avec le haut-parleur de sorte que les signaux soient transmis au haut-parleur.

**MONTAGES AVEC
DES AMPLIFICATEURS
OPÉRATIONNELS**

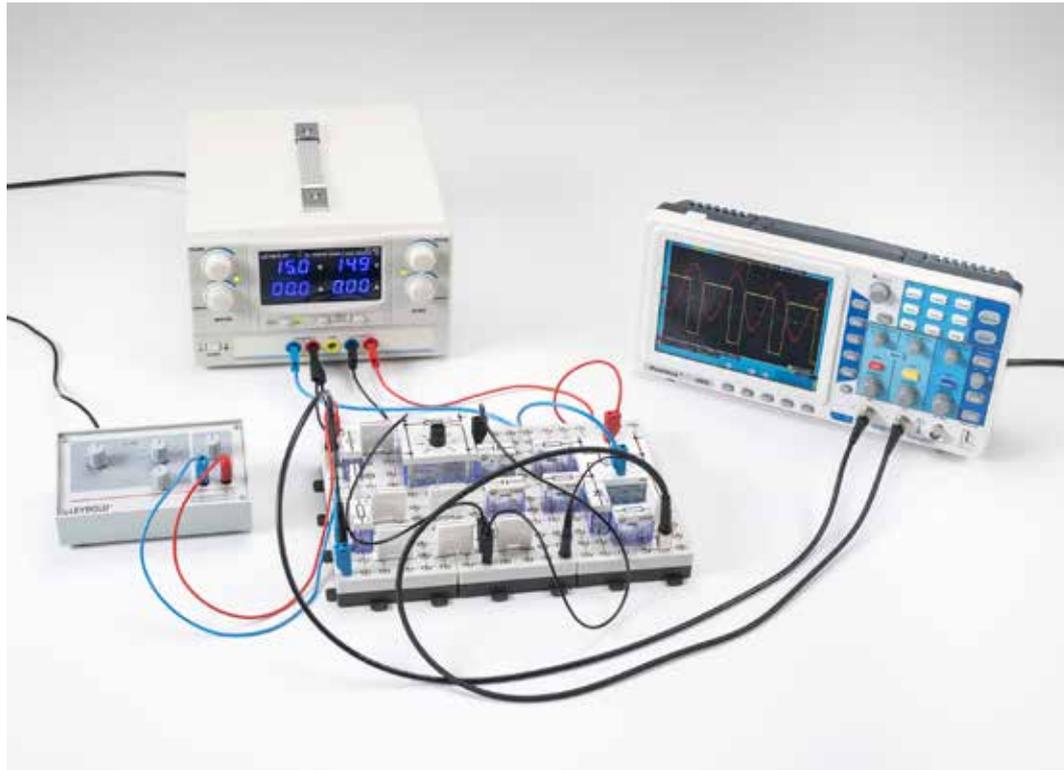
P4.2.2.1
Amplificateur opérationnel vierge
(comparateur)

P4.2.2.2
Amplificateur opérationnel inverseur

P4.2.2.3
Amplificateur opérationnel
non-inverseur

P4.2.2.4
Sommeur et soustracteur

P4.2.2.5
Différentiateur et intégrateur



Amplificateur opérationnel vierge (comparateur) (P4.2.2.1)

N° de cat.	Désignation	P4.2.2.1	P4.2.2.2	P4.2.2.3	P4.2.2.4	P4.2.2.5
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité , 20/10	3	2	2	3	2
578 85	Amplificateur opérationnel LM 741, STE 4/50	1	1	1	1	1
577 56	Résistance 10 kohms, STE 2/19	1	2	2	2	1
577 61	Résistance 33 kohms, STE 2/19	2	1		1	
577 62	Résistance 39 kohms, STE 2/19	1				
577 68	Résistance 100 kohms, STE 2/19	1	1		4	1
577 74	Résistance 470 kohms, STE 2/19	1				
577 96	Potentiomètre 100 kohms, STE 4/50	2	1			1
578 26	Condensateur 2,2 nF, STE 2/19	2				1
578 28	Condensateur 10 nF, STE 2/19	1				1
578 51	Diode 1N 4007, STE 2/19	1				
501 48	Cavalier STE 2/19, jeu de 10	1	1	1	1	1
522 621	Générateur de fonctions S 12	1	1	1		1
521 536	Alimentation CC 2 x 0...16 V/2 x 0...5 A	1	1	1	1	1
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1	1	1		1
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	2	2	2		2
500 98	Douilles d'adaptation de sécurité, noires (6)	1	1	1	1	1
500 614	Câble de connexion de sécurité 25 cm, noir	3	1	2	1	2
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	2	3	3	3	2
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	2	3	3	3	2
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir	1	1	1	1	1
577 44	Résistance 1 kOhm, STE 2/19		1		1	1
577 50	Résistance 3,3 kohms, STE 2/19		1			
577 52	Résistance 4,7 kohms, STE 2/19		1	1		1
577 64	Résistance 47 kohms, STE 2/19		2			
577 80	Rhéostat 10 kohms, STE 2/19		1	1		
531 120	Multimètre LDanalog 20		1	1	1	
577 32	Résistance 100 Ohms, STE 2/19		1			
577 40	Résistance 470 Ohms, STE 2/19		1	1		
577 46	Résistance 1,5 kohm, STE 2/19		1	1		
577 48	Résistance 2,2 kohms, STE 2/19		1			

N° de cat.	Désignation	P4.2.2.1	P4.2.2.2	P4.2.2.3	P4.2.2.4	P4.2.2.5
577 58	Résistance 15 kohms, STE 2/19			1		
577 38	Résistance 330 ohms, STE 2/19				1	
577 60	Résistance 22 kohms, STE 2/19				1	
577 76	Résistance 1 Mohm, STE 2/19					1
578 15	Condensateur 1 µF, STE 2/19					1
578 16	Condensateur 4,7 µF, STE 2/19					1
578 76	Transistor BC 140, NPN, ém. bas, STE 4/50					1

L'amplificateur opérationnel est une composante analogue importante de l'électronique actuelle. A l'origine utilisé comme unité de calcul d'un ordinateur analogue, il est devenu un amplificateur universel dans différentes applications.

L'expérience P4.2.2.1 montre que l'amplificateur opérationnel non câblé sur module pour une différence de tension infiniment petite aux entrées. Il produit un signal de sortie maximum dont le signe de polarité dépend du signe de polarité de la différence de tension à l'entrée.

Dans les expériences P4.2.2.2 et P4.2.2.3, l'amplificateur opérationnel est relié à l'entrée inverseuse, ou non inverseuse, par une résistance R_2 . Le signal d'entrée injecté par l'intermédiaire de la résistance R_1 est amplifié avec un facteur de

$$V = -\frac{R_2}{R_1}$$

avec l'amplificateur opérationnel inverseur, et avec un facteur de

$$V = \frac{R_2}{R_1} + 1$$

avec l'amplificateur opérationnel non inverseur.

Dans l'expérience P4.2.2.4, on démontre l'addition ou la soustraction de plusieurs signaux d'entrée.

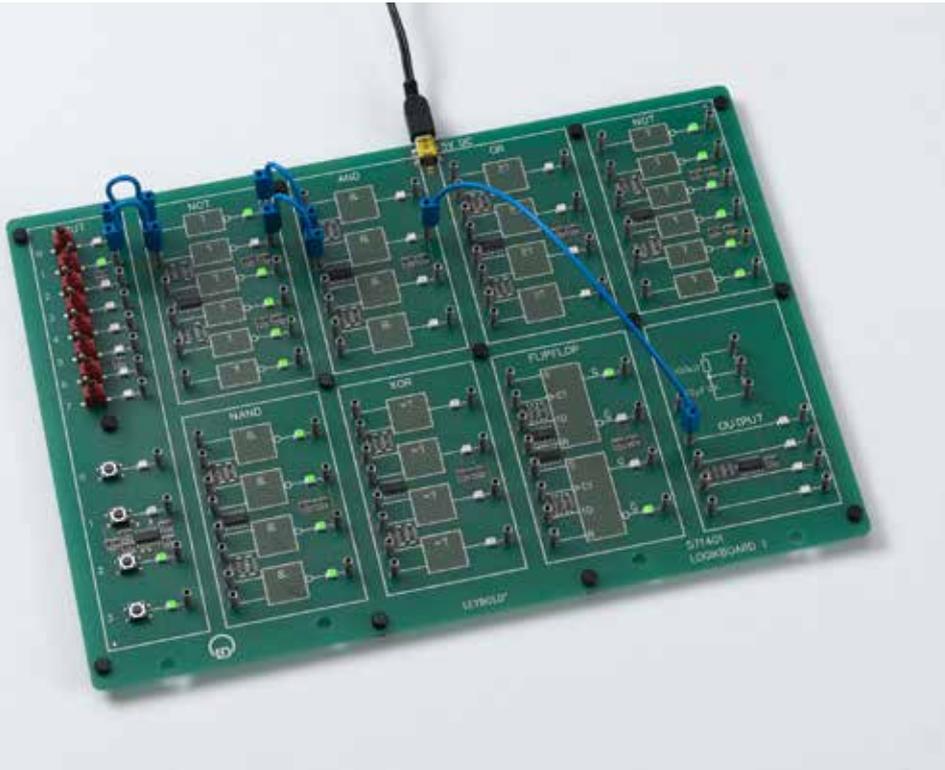
L'utilisation d'un amplificateur opérationnel comme différentiateur ou intégrateur fait l'objet de l'expérience P4.2.2.5. On connecte pour cela l'entrée ou la branche de retour de l'amplificateur opérationnel à un condensateur. Les signaux de sortie du différentiateur sont proportionnels à la dérivée des signaux d'entrée. Les signaux de sortie de l'intégrateur sont quant à eux proportionnels à l'intégrale des signaux d'entrée.

ENCHAÎNEMENTS SIMPLES

P4.5.1.1
Enchaînements ET, OU, OU-exclusif,
NON, et NON-ET à deux variables

P4.5.1.2
Lois de Morgan

P4.5.1.3
Fonctions de trois variables



Lois de Morgan (P4.5.1.2)

N° de cat.	Désignation	P4.5.1.1-3
571 4011	Carte logique 1	1

La construction d'appareils numériques repose sur le simple concept de l'application répétée de quelques circuits de base. Pour leur enchaînement, les règles valables sont celles de l'algèbre de Boole, aussi appelée algèbre logique dans le cas particulier de l'application à la technique de montage numérique.

Durant l'expérience P4.5.1.1, on représente tous les enchaînements à une ou deux variables survenant dans la technique numérique. On vérifie les lois valables dans l'algèbre de Boole, c.-à-d. les lois de commutativité, les lois d'idempotence, les lois d'absorption ainsi que les lois de la négation.

Au cours de l'expérience P4.5.1.2, on reprend expérimentalement les lois de Morgan.

L'objet de l'expérience P4.5.1.3 est la vérification expérimentale des lois d'associativité et de distributivité avec l'enchaînement à trois variables.

LES CIRCUITS LOGIQUES

P4.5.2.1
Fonctions AND, NAND, OR et
OU-exclusif de quatre variables

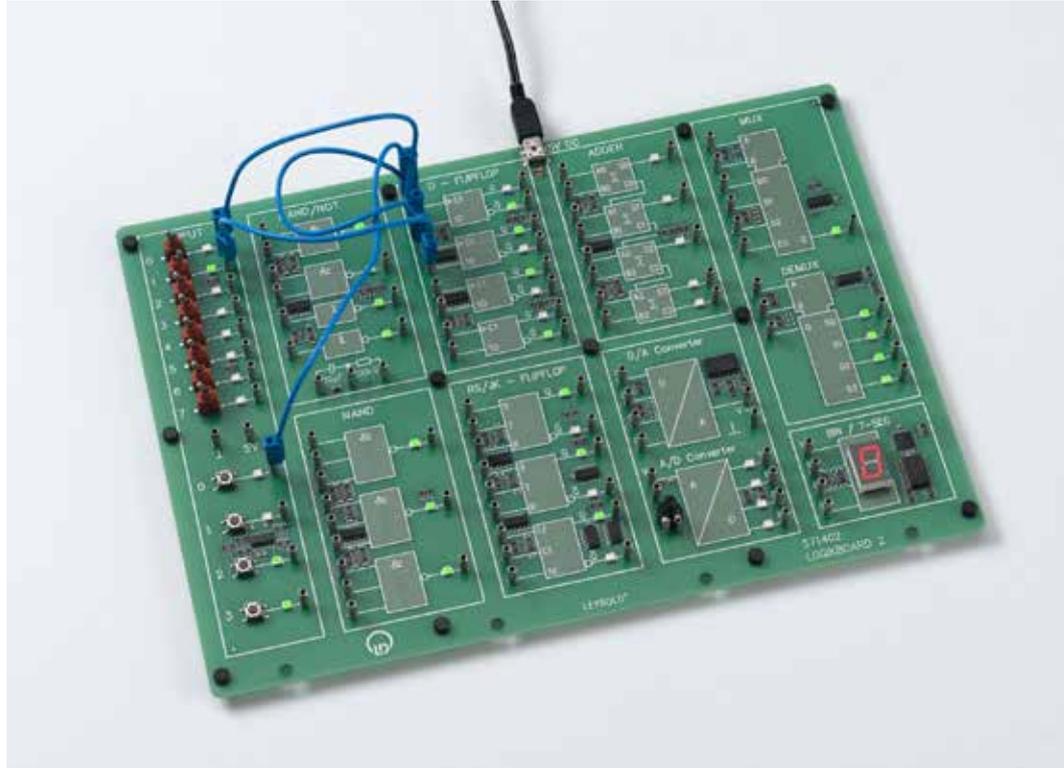
P4.5.2.3
Multiplexeur et démultiplexeur

P4.5.2.4
Sommeur

P4.5.2.5
Bascule

P4.5.2.6
Compteur

P4.5.2.7
Registre à décalage



Bascule (P4.5.2.5)

N° de cat.	Désignation	P4.5.2.1	P4.5.2.3-7
571 4011	Carte logique 1	1	
571 4021	Carte logique 2		1

Un réseau combinatoire est un enchaînement de circuits numériques pour lequel les variables de sortie sont clairement déterminées par les variables d'entrée. Avec un circuit séquentiel, on a la possibilité supplémentaire de mettre en mémoire des états de variables individuels. Les variables de sortie dépendent également de l'antécédent qui est représenté par l'état de commutation de bascules.

Au cours de l'expérience P4.5.2.1, on applique à l'enchaînement logique de quatre entrées les connaissances acquises avec les fonctions logiques de base en vue de construire des réseaux combinatoires complexes.

Dans l'expérience P4.5.2.3, on démontre la dérivation avec un multiplexeur de plusieurs entrées sur une sortie ainsi que la répartition avec un démultiplexeur des signaux d'une ligne d'entrée sur plusieurs lignes de sortie.

Dans l'expérience P4.5.2.4 additionneurs discrets et complexes sont étudiés en tant que composants essentiels d'une unité arithmétique.

Le mode de fonctionnement de bascules fait l'objet de l'expérience P4.5.2.5. On discute des différentes exigences à satisfaire par le comportement de ces composants élémentaires d'un circuit séquentiel qui ont conduit au développement de bascules RS, D et JK.

L'expérience P4.5.2.6 consiste à étudier les propriétés de compteurs numériques dans différentes configurations.

Durant l'expérience P4.5.2.7, on étudie les registres à décalage.

ECRITURES / SORTIES
ANALOGIQUES

P4.5.3.1
Convertisseur Numérique / Analogique
et Analogique / Numérique



Convertisseur Numérique / Analogique et Analogique / Numérique (P4.5.3.1)

N° de cat.	Désignation	P4.5.3.1
571 4021	Carte logique 2	1
531 120	Multimètre LDanalog 20	1

La connexion des circuits numériques avec le monde la plupart du temps analogique nécessite l'utilisation de convertisseur Numérique / Analogique et Analogique / Numérique. Sont étudiées dont les caractéristiques de transfert.

Dans l'expérience P4.5.3.1 la fonction de conversion analogique-numérique et numérique pour la conversion analogique est disponible.

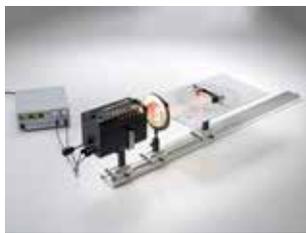
P5.5.1.1

Détermination de l'intensité du rayonnement et de l'intensité lumineuse d'une lampe à halogène

Pour plus d'informations sur cette expérience, rendez-vous à la page 170.



P5 OPTIQUE



P5.1	OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE	145
P5.2	DISPERSION, THÉORIE DES COULEURS	149
P5.3	OPTIQUE ONDULATOIRE	153
P5.4	POLARISATION	164
P5.5	INTENSITÉ LUMINEUSE	170
P5.6	VITESSE DE LA LUMIÈRE	173
P5.7	SPECTROMÈTRE	177
P5.8	PHOTONIQUE	180

P5 OPTIQUE



P5.1 OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

P5.1.1	Réflexion, réfraction	145
P5.1.2	Loi des lentilles	146
P5.1.3	Aberrations	147
P5.1.4	Instruments d'optique	148

P5.2 DISPERSION, THÉORIE DES COULEURS

P5.2.1	Indice de réfraction et dispersion	149
P5.2.3	Mélange des couleurs	150
P5.2.4	Spectres d'absorption	151
P5.2.5	Spectres de réflexion	152

P5.3 OPTIQUE ONDULATOIRE

P5.3.1	Diffraction	153-155
P5.3.2	Interférence à deux faisceaux	156
P5.3.3	Anneaux de Newton	157
P5.3.4	Interféromètre de Michelson	158-159
P5.3.5	Autres types d'interféromètres	160-161
P5.3.6	Holographie en lumière blanche par réflexion	162
P5.3.7	Holographie par transmission	163

P5.4 POLARISATION

P5.4.1	Expériences de base	164
P5.4.2	Biréfringence	165
P5.4.3	Activité optique, polarimétrie	166
P5.4.4	Effet Kerr	167
P5.4.5	Effet Pockels	168
P5.4.6	Effet Faraday	169

P5.5 INTENSITÉ LUMINEUSE

P5.5.1	Grandeurs photométriques et procédés de mesure	170
P5.5.2	Lois du rayonnement	171-172

P5.6 VITESSE DE LA LUMIÈRE

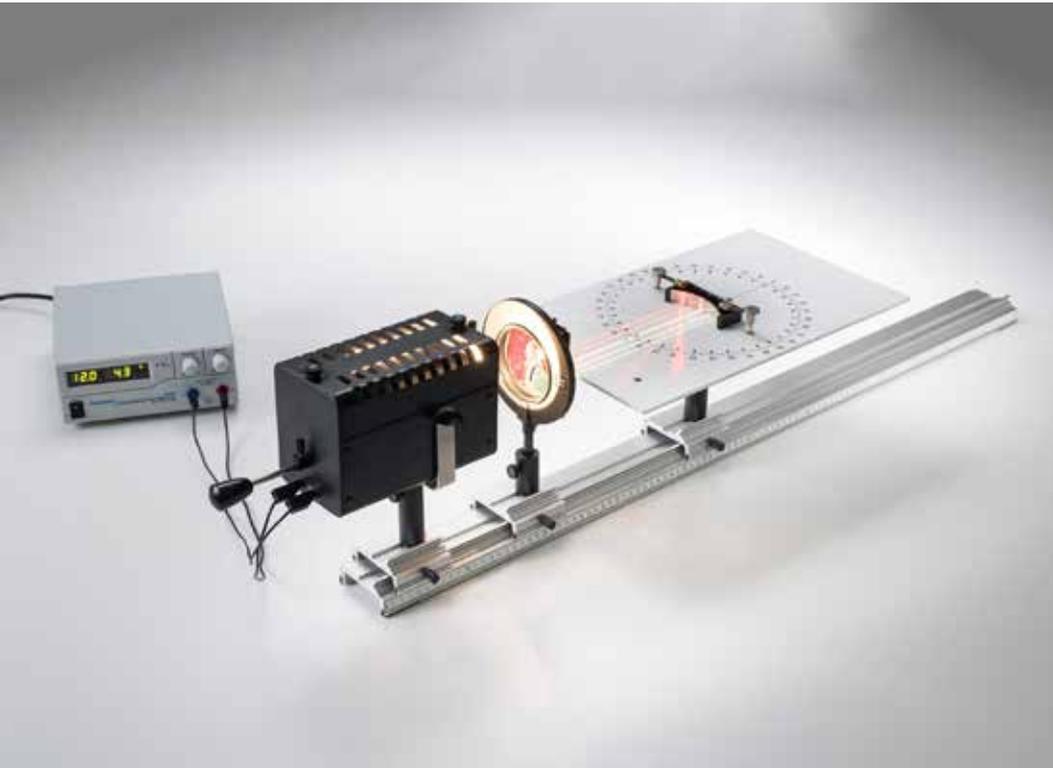
P5.6.1	Mesure selon Foucault et Michelson	173
P5.6.2	Mesure avec des impulsions lumineuses courtes	174
P5.6.3	Mesure avec un signal lumineux périodique	175-176

P5.7 SPECTROMÈTRE

P5.7.1	Spectromètre à prisme	177
P5.7.2	Spectromètre à réseau	178-179

P5.8 PHOTONIQUE

P5.8.3	Applications optiques	180
P5.8.5	Notions de base de laser	181-183
P5.8.6	Lasers à semi-conducteurs	184-185
P5.8.7	Fibre optique	186-187
P5.8.8	Applications techniques	188-189



RÉFLEXION, RÉFRACTION

P5.1.1.1

Réflexion de la lumière sur des miroirs plans et courbes

P5.1.1.2

Réfraction de la lumière par des surfaces planes et étude de la marche des rayons à travers des prismes et des lentilles

Réflexion de la lumière sur des miroirs plans et courbes (P5.1.1.1)

N° de cat.	Désignation	P5.1.1.1-2
463 52	Disque optique	1
450 641	Lampe halogène 12 V, 50/100W	1
450 681	Ampoule halogène 12 V/500 W, G6,35	1
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A	1
463 51	Diaphragme à 5 fentes	1
460 08	Lentille dans monture, $f = +150$ mm	1
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	1
460 311	Cavalier avec noix 45/65	2
460 3112	Cavalier avec noix 75/65	1
300 40	Tige 10 cm, 12 mm \varnothing	1
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir	2

Des indications concernant la marche des rayons lumineux suffisent souvent pour décrire la propagation de la lumière. A titre d'exemple, on étudie la marche des rayons lumineux obtenue avec des miroirs, des lentilles et des prismes à l'aide de modèles optiques.

Dans l'expérience P5.1.1.1, on observe la formation de l'image réfléchie lors de la réflexion sur un miroir plan et on montre que la marche des rayons lumineux est réversible. On vérifie expérimentalement la loi de la réflexion

$$\alpha = \beta$$

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

Les autres thèmes étudiés sont la réflexion d'un faisceau de rayons lumineux parallèles à l'axe optique au foyer d'un miroir concave, l'existence d'un foyer virtuel lors de la réflexion sur un miroir convexe, la relation entre la distance focale et le rayon de courbure du miroir curviligne et l'apparition d'images réelles et virtuelles lors de la réflexion sur un miroir courbes.

L'expérience P5.1.1.2 traite du changement de direction d'un rayon lumineux à la traversée d'une surface séparant deux milieux. La loi de la réfraction, découverte par *W. Snell*, est vérifiée quantitativement.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

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

n_1 : indice de réfraction du milieu 1 (ici l'air),

n_2 : indice de réfraction du milieu 2 (ici le verre)

Par ailleurs, on étudie la réflexion totale au passage de la lumière d'un milieu optiquement plus dense à un milieu optiquement moins dense, la réunion de faisceaux lumineux parallèles à l'axe dans le foyer d'une lentille convergente, l'existence d'un foyer virtuel au passage d'un faisceau de rayons lumineux parallèles à l'axe optique à travers une lentille divergente, l'apparition d'images réelles et virtuelles produites par des lentilles ainsi que la marche des rayons lumineux à travers un prisme.



Réfraction de la lumière sur des surfaces droites et étude de la trajectoire des rayons dans des prismes et des lentilles (P5.1.1.2).

LOI DES LENTILLES

P5.1.2.1

Détermination de la distance focale de lentilles convexes et concaves pour des rayons lumineux parallèles à l'axe de ces lentilles

P5.1.2.2

Détermination par autocollimation de la distance focale de lentilles convexes

P5.1.2.3

Détermination de la distance focale de lentilles convexes selon la méthode de Bessel

P5.1.2.4

Vérification de la loi des lentilles avec une lentille convexe



Vérification de la loi des lentilles avec une lentille convexe (P5.1.2.4)

N° de cat.	Désignation	P5.1.2.1	P5.1.2.2	P5.1.2.3-4
450 60	Carter de lampe avec câble	1	1	1
450 511	Ampoules 6 V/ 30 W, E14, jeu de 2	1	1	1
460 20	Condenseur asphérique	1	1	1
521 210	Transformateur 6/12 V, 30 W	1	1	1
460 02	Lentille dans monture, f = +50 mm	1		1
460 03	Lentille dans monture, f = +100 mm	1		1
460 04	Lentille dans monture, f = +200 mm	1		
460 06	Lentille dans monture, f = -100 mm	1		
441 53	Écran, translucide	1		1
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	1	1	1
460 311	Cavalier avec noix 45/65	2	2	2
460 312	Cavalier avec noix 45/35	1	1	1
311 78	Mètre ruban 2 m	1	1	1
460 08	Lentille dans monture, f = +150 mm		1	
460 09	Lentille dans monture, f = +300 mm		1	
461 66	Diapositives, jeu de 2		1	1
460 28	Miroir plan articulé 14 cm x 9 cm		1	

On détermine la distance focale d'une lentille par diverses méthodes. Les lois des lentilles jouent un rôle essentiel pour l'exploitation.

Dans l'expérience P5.1.2.1, un écran d'observation est placé parallèlement à l'axe optique de manière à ce qu'il soit possible de suivre sur l'écran la marche des rayons d'un faisceau de rayons lumineux parallèles à l'axe après son passage à travers une lentille convergente ou une lentille divergente. La distance focale correspondant à l'écart entre le foyer et la lentille est alors mesurée directement.

Pour la détermination par autocollimation (P5.1.2.2), un faisceau de rayons lumineux parallèles à l'axe optique est réfléchi derrière la lentille sur un miroir de manière à ce que l'image de l'objet soit directement à côté de l'objet. On fait varier la distance entre l'objet et la lentille jusqu'à ce que l'image et l'objet aient exactement la même taille. La distance focale vaut alors:

$$f = d$$

Pour la méthode de Bessel (P5.1.2.3), on installe un objectif et un écran d'observation séparés par une distance totale s fixe. Entre l'objectif et l'écran, on trouve deux positions de lentilles x_1 et x_2 derrière lesquelles l'objet est reproduit avec netteté sur l'écran d'observation. Pour la distance focale, on a donc d'après les lois des lentilles:

$$f = \frac{1}{4} \cdot \left(s - \frac{(x_1 - x_2)^2}{s} \right)$$

Dans l'expérience P5.1.2.4, on mesure directement pour une lentille convergente la taille de l'objet G , la distance g séparant la source lumineuse et l'objet, la taille de l'image B et la distance b séparant l'image de l'objet et on vérifie les lois des lentilles. On calcule la distance focale selon:

$$f = \frac{g \cdot b}{g + b}$$



ABERRATIONS

P5.1.3.1

Aberration sphérique pour une projection avec une lentille

P5.1.3.2

Astigmatisme et courbure de champ pour une projection avec une lentille

P5.1.3.3

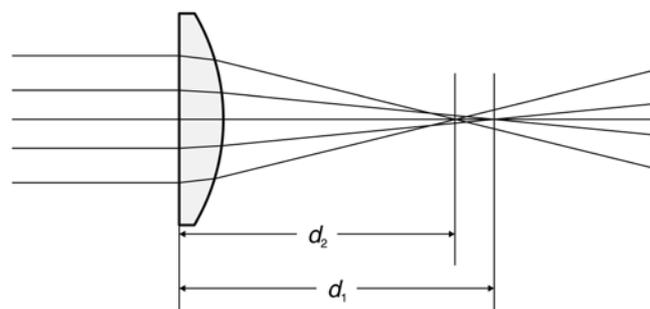
Distorsion en coussin et en barillet pour une projection avec une lentille et défaut de coma

P5.1.3.4

Aberration chromatique pour une projection avec une lentille

Aberration sphérique pour une projection avec une lentille (P5.1.3.1)

N° de cat.	Désignation	P5.1.3.1	P5.1.3.2	P5.1.3.3	P5.1.3.4
450 60	Carter de lampe avec câble	1	1	1	1
450 511	Ampoules 6 V/ 30 W, E14, jeu de 2	1	1	1	1
460 20	Condenseur asphérique	1	1	1	1
521 210	Transformateur 6/12 V, 30 W	1	1	1	1
461 61	Diaphragmes pour l'étude des aberrations sphériques, jeu de 2	1			
461 66	Diapositives, jeu de 2	1	1	1	
460 08	Lentille dans monture, $f = +150$ mm	1	1	1	1
460 26	Diaphragme à iris	1	1		1
441 53	Écran, translucide	1	1	1	1
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	1	1	1	1
460 311	Cavalier avec noix 45/65	2	2	2	2
460 312	Cavalier avec noix 45/35	2	2	2	2
460 02	Lentille dans monture, $f = +50$ mm			1	
467 95	Filtres colorés, couleurs primaires, jeu de 3				1



Distance focale de rayons près de l'axe et loin de l'axe (P5.1.3.1)

Une lentille sphérique ne projette un point en un point idéal que lorsque les rayons émergents coupent l'axe optique sous un petit angle et que les angles d'incidence et de réfraction à la traversée de la lentille sont eux aussi petits. Dans la pratique, cette condition n'est remplie qu'en partie, raison pour laquelle les aberrations sont inévitables.

Dans les expériences P5.1.3.1 et P5.1.3.2, on considère des imperfections au niveau de la netteté de l'image. Des rayons près de l'axe ont, dans une marche de rayons lumineux parallèles à l'axe, une distance focale différente de celle des rayons qui sont loin de l'axe. Cet effet, appelé «aberration sphérique», apparaît en particulier pour des lentilles à forte courbure. L'astigmatisme et la courbure de champ sont observés quand un objet agrandi est traversé par un faisceau lumineux étroit. Le plan focal est, en réalité, une surface curviligne; l'image sur l'écran d'observation est donc de plus en plus floue sur les bords lorsqu'elle est nette au milieu. On appelle astigmatisme (absence de point) le fait que même un faisceau lumineux étroitement limité ne fournit pas une image ponctuelle mais plutôt deux lignes images perpendiculaires entre elles séparées d'une distance finie dans la direction de l'axe.

Les imperfections relatives à l'échelle de l'image font l'objet de l'expérience P5.1.3.3. Lors de la projection de l'image, des distorsions sont occasionnées par un diaphragme placé devant ou derrière la lentille. La suppression de rayons lumineux devant la lentille provoque une distorsion en barillet c.-à-d. une diminution de l'échelle de l'image au fur et à mesure que l'objet grandit. La suppression de rayons lumineux derrière la lentille donne une distorsion en coussinet. On appelle coma une aberration qui donne une image en aigrette lors de la projection avec un faisceau lumineux traversant obliquement la lentille.

Dans l'expérience P5.1.3.4, on étudie les aberrations chromatiques. Elles résultent du changement de l'indice de réfraction avec la longueur d'onde et sont par conséquent inévitables lorsque l'on a recours à une lumière non monochromatique.

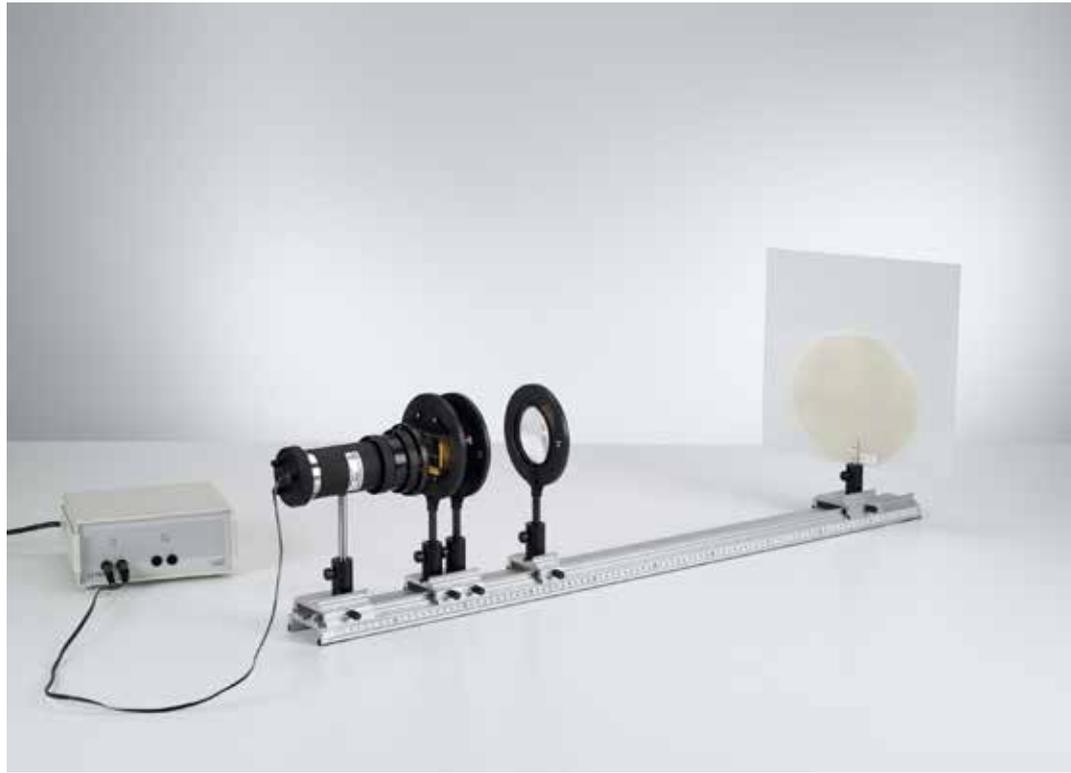
INSTRUMENTS D'OPTIQUE

P5.1.4.1

Loupe et microscope

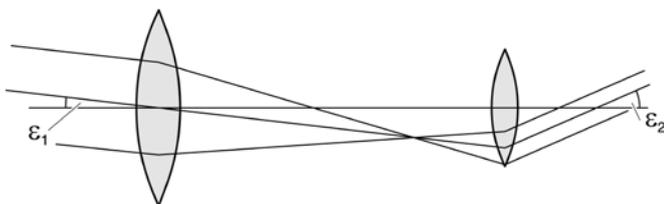
P5.1.4.2

Lunette astronomique de Kepler et de Galilée



Loupe et microscope (P5.1.4.1)

N° de cat.	Désignation	P5.1.4.1	P5.1.4.2
450 60	Carter de lampe avec câble	1	
450 511	Ampoules 6 V/ 30 W, E14, jeu de 2	1	
460 20	Condenseur asphérique	1	
521 210	Transformateur 6/12 V, 30 W	1	
460 22	Monture-support avec pinces à ressort	1	
311 091	Réglette en verre 50 mm	1	
460 02	Lentille dans monture, f = +50 mm	1	1
460 03	Lentille dans monture f = +100 mm	1	1
460 08	Lentille dans monture, f = +150 mm	1	
460 04	Lentille dans monture, f = +200 mm	1	1
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	1	1
460 311	Cavalier avec noix 45/65	2	
460 312	Cavalier avec noix 45/35	4	2
441 53	Écran, translucide	1	
311 78	Mètre ruban 2 m	1	
460 05	Lentille dans monture, f = +500 mm		1
460 06	Lentille dans monture, f = -100 mm		1
311 22	Règle verticale		1
300 11	Socle		1



Marche d'un rayon lumineux traversant la lunette astronomique de Kepler (P5.1.4.2)

La loupe, le microscope et la longue-vue sont présentés comme des instruments optiques dont la principale propriété est l'agrandissement de l'objet observé. Les affirmations quantitatives reposent sur la définition usuelle du grossissement:

$$V = \frac{\tan \alpha}{\tan \alpha_0}$$

α : angle visuel avec instrument

α_0 : angle visuel sans instrument

Dans l'expérience P5.1.4.1, on considère des petits objets assez rapprochés. On se sert tout d'abord d'une lentille convergente comme loupe puis on monte un microscope dans sa réalisation la plus simple avec deux lentilles convergentes. La première lentille, l'objectif, produit une image intermédiaire réelle, agrandie et inversée. La seconde lentille, l'oculaire, sert de loupe pour observer l'image intermédiaire. Le grossissement total du microscope vaut

$$V_M = V_{ob} \cdot V_{ok}$$

V_{ob} : agrandissement de l'objectif

V_{ok} : agrandissement de l'oculaire

Avec V_{ok} correspondant ici à l'agrandissement de la loupe

$$V_{ok} = \frac{s_0}{f_{ok}}$$

s_0 : distance de vision directe

f_{ok} : distance focale de l'oculaire

L'observation d'objets très éloignés à l'aide d'une longue-vue fait l'objet de l'expérience P5.1.4.2. L'objectif et l'oculaire d'une longue-vue sont disposés de telle manière que le foyer arrière de l'objectif coïncide avec le foyer avant de l'oculaire. On distingue la lunette de Galilée dans laquelle une lentille divergente produisant une image droite joue le rôle d'oculaire et la lunette astronomique de Kepler où une lentille convergente produisant une image inversée sert d'oculaire. Dans les deux cas, le grossissement total vaut:

$$V_T = \frac{f_{ob}}{|f_{oc}|}$$

f_{ob} : distance focale de l'objectif

f_{oc} : distance focale de l'oculaire



INDICE DE RÉFRACTION ET DISPERSION

P5.2.1.1

Determinación del índice de refracción y determinación de la dispersión en vidrio Flint y en vidrio sin plomo

P5.2.1.2

Détermination de l'indice de réfraction et de dispersion de liquides

Détermination de l'indice de réfraction et de dispersion de liquides (P5.2.1.2)

N° de cat.	Désignation	P5.2.1.1	P5.2.1.2
465 22	Prisme en Crown	1	
465 32	Prisme en verre flint	1	
460 25	Plateau pour prisme	1	1
460 22	Monture-support avec pinces à ressort	1	1
450 60	Carter de lampe avec câble	1	1
450 511	Ampoules 6 V/ 30 W, E14, jeu de 2	1	1
460 20	Condenseur asphérique	1	1
521 210	Transformateur 6/12 V, 30 W	1	1
468 03	Filtre monochromatique, rouge	1	1
468 07	Filtre monochromatique, jaune-vert	1	1
468 11	Filtre monochromatique, bleu-violet	1	1
460 08	Lentille dans monture, f = +150 mm	1	1
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	1	1
460 311	Cavalier avec noix 45/65	1	1
460 312	Cavalier avec noix 45/35	3	3
311 78	Mètre ruban 2 m	1	1
665 002	Entonnoir Boro 3.3, 35 mm Ø		1
675 2100	Toluène, 250 ml		1
675 0410	Essence de térébenthine, rectifiée, 250		1
675 4760	Cinnamate d'éthyle, 100 ml		1

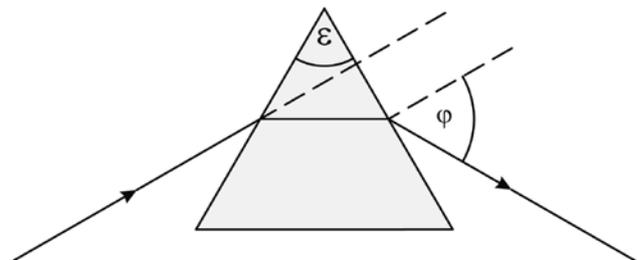
On appelle dispersion le fait que l'indice de réfraction n diffère suivant la couleur des rayons lumineux. Souvent, on entend également par dispersion la grandeur $dn/d\lambda$. c.-à-d. le quotient du changement d'indice de réfraction dn par le changement de longueur d'onde $d\lambda$.

Dans l'expérience P5.2.1.1, on détermine l'angle ϑ de la déviation minimale pour un prisme en flint et un prisme en crown avec un même angle de réfraction ε . C'est ainsi qu'on obtient l'indice de réfraction n du matériau du prisme selon

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(\varepsilon + \varphi)}{\sin \frac{1}{2}\varepsilon}$$

La mesure est réalisée pour différentes longueurs d'onde de manière à ce qu'une détermination quantitative de la dispersion soit également possible.

Dans l'expérience P5.2.1.2, on étudie aussi le pouvoir dispersif des liquides dans un montage analogue, réalisé selon le même principe. On verse successivement du toluène, de l'essence de térébenthine, du cinnamate d'éthyle, de l'alcool et de l'eau dans un prisme creux. On observe alors de grands changements de l'</uni>indice de réfraction et de la dispersion.



Trajet d'un rayon à travers un prisme (P5.2.1.1)

MÉLANGE DES COULEURS

P5.2.3.2

Démonstration du mélange additif des couleurs

P5.2.3.3

Démonstration du mélange soustractif des couleurs

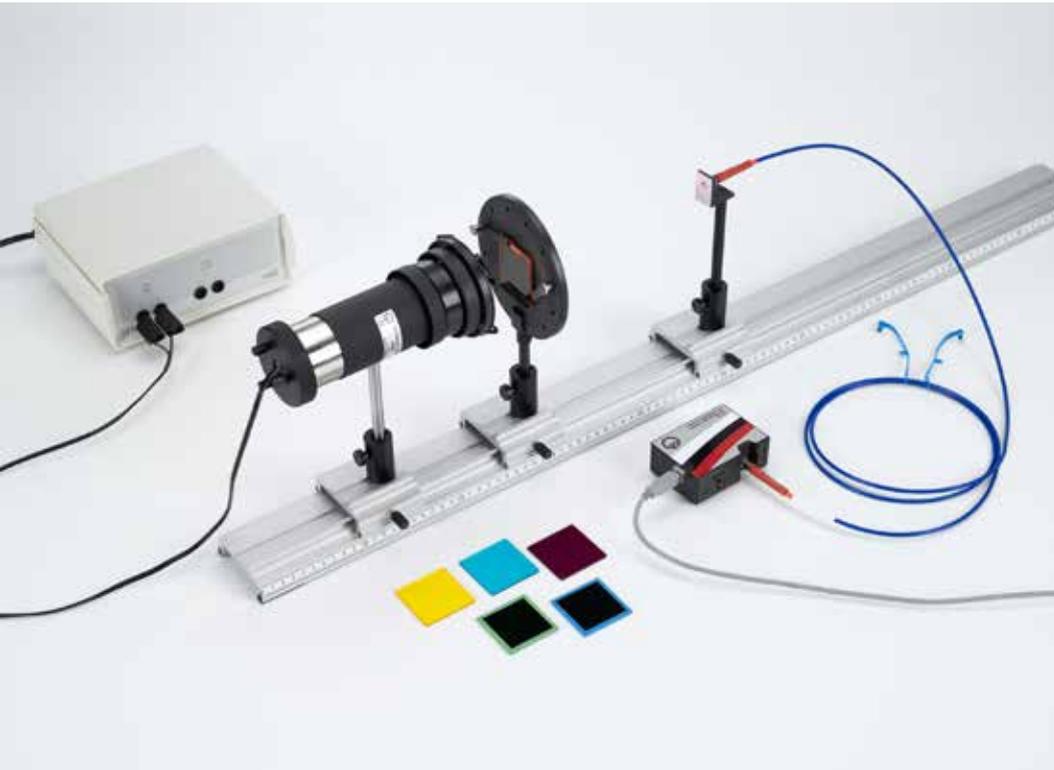


Démonstration du mélange additif des couleurs (P5.2.3.2)

N° de cat.	Désignation	P5.2.3.2	P5.2.3.3
459 098	Lampe DEL triple	1	
459 095	Alimentation enfichable USB 5V CC (prise A)	1	1
459 096	Câble USB (connecteur A - connecteur Mini-B)	1	1
460 03	Lentille dans monture $f = +100$ mm	1	1
460 22	Monture-support avec pinces à ressort	1	1
688 045	Volet obturateur, jeu de 6	1	
467 95	Filtres colorés, couleurs primaires, jeu de 3	1	1
467 96	Filtres colorés, couleurs secondaires, jeu de 3	1	1
467 97	Filtre à 3 couleurs	1	
441 53	Écran, translucide	1	1
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	1	1
460 311	Cavalier avec noix 45/65	1	1
460 312	Cavalier avec noix 45/35	2	3
460 313	Cavalier avec colonne de fixation	1	1
459 094	Lampe DEL		1
460 02	Lentille dans monture, $f = +50$ mm		1
311 78	Mètre ruban 2 m		1

La reconnaissance de couleur est déterminée par 3 types de récepteurs de lumière situés dans la rétine de l'œil humain. De la décomposition différentes couleurs du spectre visible avec la sensibilité de chacune des récepteurs découle une division des couleurs primaires rouge, vert et bleu. Deux couleurs primaires donnent des couleurs secondaires cyan, magenta et jaune. Ce qui veut dire que les filtres des couleurs secondaires absorbent seulement chaque troisième couleur primaire. En additionnant les trois couleurs primaires, on obtient la couleur blanche.

L'expérience P5.2.3.2 consiste à juxtaposer différents filtres colorés (rouge, vert, bleu) devant une lampe avec 3 sources lumineuses. Dans l'image obtenue, ces couleurs primaires se superposent et illustrent la synthèse additive des couleurs. La synthèse soustractive des couleurs est montrée dans l'expérience P5.2.3.3. Pour ce faire, on place des filtres colorés (jaune, magenta, cyan) en partie superposés dans le faisceau lumineux d'une lampe.



SPECTRES D'ABSORPTION

P5.2.4.3

Spectres d'absorption de verres teintés - Tracé et exploitation avec un spectrophotomètre

P5.2.4.4

Spectres d'absorption et de fluorescence de liquides teintés - Tracé et exploitation avec un spectrophotomètre

P5.2.4.5

Spectres d'absorption de fibres optiques PMMA - Tracé et exploitation avec un spectrophotomètre

Démonstration du mélange additif des couleurs (P5.2.3.2)

N° de cat.	Désignation	P5.2.4.3	P5.2.4.4	P5.2.4.5
467 96	Filtres colorés, couleurs secondaires, jeu de 3	1		
468 01	Filtre monochromatique, rouge foncé	1		
468 09	Filtre monochromatique, bleu-vert	1		
468 11	Filtre monochromatique, bleu-violet	1	1	
460 22	Monture-support avec pinces à ressort	1	1	
450 60	Carter de lampe avec câble	1	1	
450 511	Ampoules 6 V/ 30 W, E14, jeu de 2	1	1	
460 20	Condenseur asphérique	1	1	
521 210	Transformateur 6/12 V, 30 W	1	1	
467 251	Spectromètre compact, physique	1	1	1
460 251	Support pour fibres	1	1	1
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	1	1	
460 311	Cavalier avec noix 45/65	3	4	
477 14	Cuvette à faces parallèles en verre optique, 50 x 50 x 20 mm		1	
460 25	Plateau pour prisme		1	
300 11	Socle		1	2
300 40	Tige 10 cm, 12 mm Ø		1	
301 01	Noix Leybold		1	
604 5672	Microspatule double, acier, 150 mm		1	
672 0110	Fluorescéine, 25 g		1	
451 17	Douille E27, connecteur Europe			1
505 302	Lampe à halogène 230 V/ 46 W, E27			1
579 44	Fibres optiques, jeu de 2			1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1	1

L'effet de couleur des verres ou des liquides que l'on observe par transparence est produit par la part transmise des couleurs spectrales.

Dans l'expérience P5.2.4.3, la lumière d'une lampe traversant des verres colorés est enregistrée par un spectromètre et comparée avec un spectre continu de la lumière de la lampe. Le spectre original continu des différentes couleurs spectrales disparaît. Il ne reste qu'une bande composée de quelques couleurs du filtre. Le coefficient de transmission et la densité optique des verres colorés est calculé.

Dans l'expérience P5.2.4.4, la lumière d'une lampe traversant des liquides colorés est enregistrée par un spectromètre et comparée avec un spectre continu de la lumière de la lampe. La lumière fluorescente du liquide coloré est enregistrée sous un angle droit. On utilise un filtre bleu à l'aide duquel on différencie clairement la fluorescence d'une diffusion de lumière. Le spectre d'absorption et de fluorescence sont comparés à au spectre continu de lumière de la lampe.

Dans l'expérience P5.2.4.5, on étudie la transmission optique de la fibre conductrice de lumière. Les sons harmoniques des oscillations moléculaires conduisent à des plages spectrales où la fibre est transparente et à d'autres où elle absorbe fortement („fenêtre optique“). Ces sons harmoniques sont enregistrés et évalués à l'aide d'un spectromètre compact.



Spectres d'absorption et de fluorescence de liquides teintés (P5.2.4.4)

SPECTRES DE RÉFLEXION

P5.2.5.1
Spectres de réflexion sur différents matériaux - Tracé et exploitation avec un spectrophotomètre

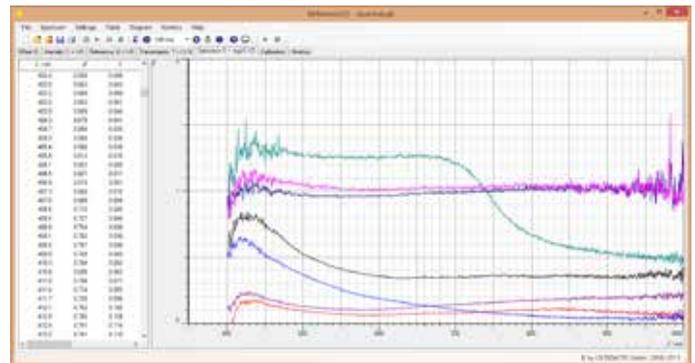


Spectres de réflexion sur différents matériaux - Tracé et exploitation avec un spectrophotomètre (P5.2.5.1)

N° de cat.	Désignation	P5.2.5.1
567 06	Conducteurs et isolants, jeu de 6	1
460 22	Monture-support avec pinces à ressort	1
450 60	Carter de lampe avec câble	1
450 511	Ampoules 6 V/ 30 W, E14, jeu de 2	1
460 20	Condenseur asphérique	1
521 210	Transformateur 6/12 V, 30 W	1
467 251	Spectromètre compact, physique	1
460 251	Support pour fibres	1
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	1
460 311	Cavalier avec noix 45/65	3
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

L'impression en couleur d'objets laissant traverser la lumière est réalisée à l'aide de la composante réfléchissante des couleurs spectrales.

Dans l'expérience P5.2.5.1, la réflexion sur différents matériaux de la lumière d'une lampe à incandescence est enregistrée à l'aide d'un spectromètre. Par comparaison avec la réflexion d'une feuille de papier blanc (lumière diffusée), le coefficient de réflexion peut être calculé.



Réflectivité de différents matériaux par rapport à la longueur d'onde (P5.2.5.1).



DIFFRACTION

P5.3.1.1

Diffraction par une fente, par un trait et par un diaphragme à trou circulaire

P5.3.1.2

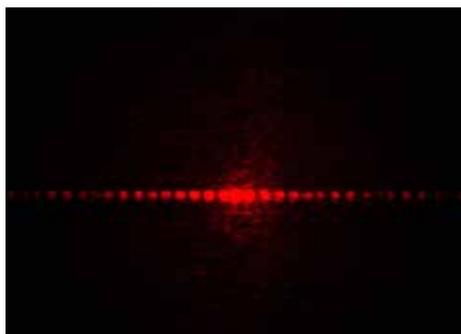
Diffraction par une fente double et par des fentes multiples

P5.3.1.3

Diffraction par des réseaux croisés à une et à deux dimensions

Diffraction par une fente double et par des fentes multiples (P5.3.1.2)

N° de cat.	Désignation	P5.3.1.1	P5.3.1.2	P5.3.1.3
469 91	Diaphragme à 3 fentes simples	1		
469 96	Diaphragme à 3 orifices de diffraction	1		
469 97	Diaphragme à 3 traits de diffraction	1		
460 22	Monture-support avec pinces à ressort	1	1	1
471 830	Laser He-Ne à polarisation linéaire	1	1	1
460 01	Lentille dans monture, f = +5 mm	1	1	1
460 02	Lentille dans monture, f = +50 mm	1	1	1
460 32	Banc d'optique à profil normalisé, 1 m	1	1	1
460 370	Cavalier 60/34 pour l'optique	4	4	4
441 53	Écran, translucide	1	1	1
300 11	Socle	1	1	1
469 84	Diaphragme à 3 fentes doubles		1	
469 85	Diaphragme à 4 fentes doubles		1	
469 86	Diaphragme à 5 fentes multiples		1	
469 87	Diaphragme à 3 réseaux, 20, 40, 80/cm			1
469 88	Diaphragme à 2 réseaux croisés			1



Modèle d'interférence de l'expérience P5.3.1.2 à l'écran (P5.3.1.2)

Dans l'expérience P5.3.1.1, on étudie les minima d'intensité de diffraction par une fente. Pour une fente de largeur b , l'angle de diffraction ϑ_k par rapport à l'axe optique est donné par :

$$\sin \vartheta_k = k \cdot \frac{\lambda}{b} \quad (k = 1; 2; 3; \dots)$$

λ : longueur d'onde de la lumière

On arrive à un résultat analogue avec la diffraction par un trait selon le théorème de Babinet. Lors de la diffraction par un diaphragme à trou circulaire de rayon r on observe des anneaux de diffraction concentriques dont les minima d'intensité sont obtenus pour les angles ϑ_k avec

$$\sin \vartheta_k = k \cdot \frac{\lambda}{r} \quad (k = 0,610; 1,116; 1,619; \dots)$$

Dans l'expérience P5.3.1.2, on considère la diffraction par une fente double. Des maxima d'intensité se forment par interférences constructives des ondes élémentaires issues de la première fente avec celles de la seconde fente: pour une distance d donnée entre le milieu de la première fente et celui de la seconde fente, les angles ϑ_n de ces maxima d'intensité sont donnés par :

$$\sin \vartheta_n = n \cdot \frac{\lambda}{d} \quad (n = 0; 1; 2; \dots)$$

L'intensité des différents maxima n'est pas constante étant donné qu'il y a superposition de l'influence de la diffraction par une fente simple. Dans le cas d'une diffraction par plus de deux fentes de même écartement d , la position des maxima d'intensité reste inchangée. Entre deux maxima, on trouve en plus $N-2$ maxima secondaires dont l'intensité s'affaiblit de plus en plus pour une largeur b fixe de la fente et un nombre de fentes N croissant.

Dans l'expérience P5.3.1.3, on étudie la diffraction par un réseau à traits et par deux réseaux croisés. Ces deux réseaux forment entre eux un angle de 90° . Les maxima de diffraction sont des points situés aux points d'intersection d'un réseau linéaire et quadratique.

DIFFRACTION

P5.3.1.4
Diffraction par une fente simple -
tracé et évaluation avec CASSY

P5.3.1.5
Diffraction par une fente double et
par des fentes multiples - tracé et
évaluation avec CASSY



Diffraction par une fente simple - tracé et évaluation avec CASSY (P5.3.1.4)

N° de cat.	Désignation	P5.3.1.4	P5.3.1.5
460 14	Fente réglable	1	
471 830	Laser He-Ne à polarisation linéaire	1	1
460 22	Monture-support avec pinces à ressort	1	2
460 01	Lentille dans monture, f = +5 mm	1	1
460 02	Lentille dans monture, f = +50 mm	1	1
460 33	Banc d'optique à profil normalisé, 2 m	1	1
460 374	Cavalier 90/50 pour l'optique	4	4
460 383	Cavalier à déplacement latéral 90/50	1	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1	1
524 220	CASSY Lab 2	1	1
524 444	Capteur de Lux M	1	1
524 082	Capteur de rotation S	1	1
301 07	Pince de table simple	1	1
309 48	Fil de pêche	1	1
342 63	Masses marquées de 50 g	1	1
469 84	Diaphragme à 3 fentes doubles		1
469 85	Diaphragme à 4 fentes doubles		1
469 86	Diaphragme à 5 fentes multiples		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1

Un capteur de Lux est employé pour mesurer les intensités de diffraction. Cette cellule peut se déplacer sur un cavalier perpendiculairement à l'axe optique et sa position latérale se mesure par le biais d'un capteur de rotation.

Dans l'expérience P5.3.1.4, on étudie la diffraction par une fente de largeur variable. Les valeurs mesurées enregistrées pour l'intensité I sont comparées avec le résultat d'un modèle de calcul réalisé pour de petits angles de diffraction ϑ dans lequel la largeur de fente b est retenue comme paramètre:

$$I \sim \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \vartheta\right)}{\frac{\pi b}{\lambda} \vartheta} \right)^2 \quad \text{avec } \vartheta = \frac{s}{L}$$

λ : longueur d'onde de la lumière

s : déplacement latéral de la cellule photo-électrique

L : écart entre l'objet de diffraction et la cellule photo-électrique

Dans l'expérience P5.3.1.5, on considère la diffraction par des fentes multiples. La largeur des fentes b et la distance d entre les fentes sont retenues comme paramètres dans le modèle de calcul réalisé pour la comparaison

$$I \sim \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \vartheta\right)}{\frac{\pi b}{\lambda} \vartheta} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{N\pi d}{\lambda} \vartheta\right)}{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \vartheta\right)} \right)^2$$

N : nombre de fentes éclairées

DIFFRACTION

P5.3.1.9
Étude de la cohérence spatiale d'une source lumineuse étendue



Étude de la cohérence spatiale d'une source lumineuse étendue (P5.3.1.9)

N° de cat.	Désignation	P5.3.1.9
451 062	Lampe spectrale Hg 100	1
451 16	Carter pour lampes spectrales	1
451 30	Bobine de self universelle 230 V, 50 Hz	1
460 32	Banc d'optique à profil normalisé, 1 m	1
460 370	Cavalier 60/34 pour l'optique	2
460 373	Cavalier 60/50 pour l'optique	1
460 374	Cavalier 90/50 pour l'optique	3
468 07	Filtre monochromatique, jaune-vert	1
460 22	Monture-support avec pinces à ressort	2
688 045	Volet obturateur, jeu de 6	1
460 14	Fente réglable	1
469 85	Diaphragme à 4 fentes doubles	1
460 02	Lentille dans monture, f = +50 mm	1
460 135	Oculaire avec échelle graduée	1

La cohérence est la capacité de différentes ondes à provoquer l'apparition d'interférences stationnaires. La cohérence spatiale d'une source de lumière peut être étudié à l'aide de l'expérience double fente. Dans celle-ci, une source de lumière éclaire une fente double de largeur de fente b et d'un écart de fente g . Dans le cas où des parties du rayonnements lumineux envoyées sont cohérentes au niveau de la double fente, alors on peut observer une figure d'interférence après la double fente. La condition pour un éclairage cohérent des deux fentes est

$$\Delta s = a \cdot \sin \alpha = \frac{1}{2} \cdot \frac{a}{L} (g + b) < \frac{\lambda}{2}$$

Dans l'expérience P5.3.1.9, on étudie la condition de cohérence. On utilise ici comme source lumineuse une fente simple réglable illuminée par une lampe spectrale à mercure (Hg). On obtient ainsi après un filtre une source de lumière monochromatique de largeur variable a . A une distance L de la fente simple, on éclaire des fentes doubles ayant des écarts différents g (largeur fixe b). Pour chaque écart de fente g , la largeur a de la fente simple est définie pour laquelle la figure d'interférence après la fente double devient floue, c'est-à-dire le cas pour lequel la condition de cohérence n'est plus remplie.

INTERFÉRENCE À
DEUX FAISCEAUX

P5.3.2.1
Interférence sur le miroir de Fresnel
avec un laser He-Ne

P5.3.2.2
Expérience avec le miroir de Lloyd à
l'aide d'un laser He-Ne

P5.3.2.3
Interférence sur le biprisme de Fresnel
avec un laser He-Ne



Interférence sur le miroir de Fresnel avec un laser He-Ne (P5.3.2.1)

N° de cat.	Désignation	P5.3.2.1-2	P5.3.2.3
471 830	Laser He-Ne à polarisation linéaire	1	1
471 05	Miroirs de Fresnel, réglable	1	
460 01	Lentille dans monture, f = +5 mm	1	1
460 04	Lentille dans monture, f = +200 mm	1	1
460 32	Banc d'optique à profil normalisé, 1 m	1	1
460 370	Cavalier 60/34 pour l'optique	3	3
460 373	Cavalier 60/50 pour l'optique	1	1
441 53	Écran, translucide	1	1
300 11	Socle	1	1
311 53	Pied à coulisse	1	1
311 78	Mètre ruban 2 m	1	1
471 09	Biprisme		1
460 25	Plateau pour prisme		1

Trois expériences nous permettent de comprendre la formation de deux sources lumineuses cohérentes. Dans les expériences, on détermine à chaque fois la longueur d'onde λ de la lumière utilisée à partir de la distance d entre deux franges d'interférence et de l'écartement a des sources lumineuses (virtuelles). Pour une distance L suffisamment grande entre les sources lumineuses (virtuelle) et l'écran de projection, on a

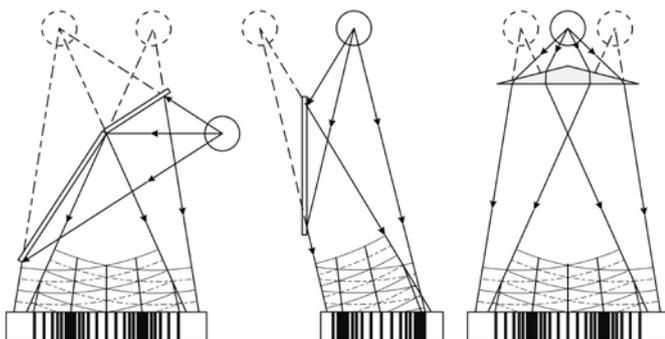
$$\lambda = a \cdot \frac{d}{L}$$

La détermination de la grandeur a dépend du dispositif expérimental.

En 1821, par réflexion d'une source lumineuse sur deux miroirs inclinés l'un par rapport à l'autre, *A. Fresnel* crée deux sources lumineuses virtuelles, très rapprochées l'une de l'autre qui interfèrent entre elles du fait de leur cohérence - P5.3.2.1.

En 1839, *H. Lloyd* a montré qu'il était possible, par réflexion sur un miroir, de produire une seconde source lumineuse virtuelle cohérente à la première. Il observa les interférences entre la lumière incidente et la lumière réfléchie - P5.3.2.2.

La production de sources lumineuses cohérentes se réalise également grâce au biprisme de *A. Fresnel* qui date de 1826. Deux images virtuelles sont créées par réfraction dans les deux moitiés de prisme; ces images sont d'autant plus proches que l'angle des prismes est petit - P5.3.2.3.



Miroir Fresnel - Miroir Lloyd - biprisme (P5.3.2.1-3)

ANNEAUX DE NEWTON

P5.3.3.1

Les anneaux de Newton par transmission avec une lumière monochromatique

P5.3.3.2

Les anneaux de Newton par transmission et réflexion avec une lumière blanche



Les anneaux de Newton par transmission et réflexion avec une lumière blanche (P5.3.3.2)

N° de cat.	Désignation	P5.3.3.1	P5.3.3.2
471 111	Verres pour l'expérience des anneaux colorés de Newton	1	1
460 03	Lentille dans monture f = +100 mm	2	
460 26	Diaphragme à iris	1	
460 22	Monture-support avec pinces à ressort	1	
460 32	Banc d'optique à profil normalisé, 1 m	1	1
460 370	Cavalier 60/34 pour l'optique	6	5
451 111	Lampe spectrale Na	1	
451 062	Lampe spectrale Hg 100	1	
451 16	Carter pour lampes spectrales	1	
451 30	Bobine de self universelle 230 V, 50 Hz	1	
468 30	Filtre monochromatique, jaune	1	
468 31	Filtre monochromatique, vert	1	
468 32	Filtre monochromatique, bleu	1	
441 53	Écran, translucide	1	
300 11	Socle	1	
460 04	Lentille dans monture, f = +200 mm		2
460 373	Cavalier 60/50 pour l'optique	1	
460 380	Bras de rallonge	1	
471 88	Lame séparatrice	2	
450 641	Lampe halogène 12 V, 50/100W	1	
450 63	Ampoule halogène 12 V/100 W, G6,35	1	
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A	1	
500 98	Douilles d'adaptation de sécurité, noires (6)	1	
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir		2

Pour créer des anneaux de Newton, on utilise une lentille convexe très légèrement curviligne en contact avec une plaque de verre de telle manière qu'il se forme un coin d'air avec une surface de délimitation à courbure sphérique. Lorsque l'on éclaire le dispositif avec une lumière incidente à rayons parallèles, des anneaux concentriques (anneaux de Newton) se forment aussi bien par réflexion que par transmission, autour du point de contact des deux surfaces de verre. Pour déterminer la différence de marche optique des sous-faisceaux interférents, l'épaisseur d , qui ne dépend pas linéairement de l'écartement r au point de contact, joue un rôle important:

$$d = \frac{r^2}{2R}$$

R : rayon de courbure de la lentille convexe

Dans l'expérience P5.3.3.1, on étudie les anneaux de Newton par transmission avec une lumière monochromatique. On détermine le rayon de courbure R à partir du rayon r_n des anneaux d'interférence, la longueur d'onde λ de la lumière étant connue. La condition d'interférence constructive est

$$d = n \cdot \frac{\lambda}{2} \text{ avec } n = 0, 1, 2, \dots$$

On a donc pour les rayons des anneaux d'interférence clairs

$$r_n^2 = n \cdot R \cdot \lambda \text{ avec } n = 0, 1, 2, \dots$$

Dans l'expérience P5.3.3.2, les anneaux de Newton sont étudiés aussi bien par réflexion que par transmission. Étant donné que les sous-faisceaux lumineux subissent dans le coin d'air un saut de phase de $\lambda/2$ à chaque réflexion sur les surfaces de verre, les conditions d'interférence pour la réflexion et pour la transmission sont complémentaires. Les rayons r_n des anneaux d'interférence clairs sont par transmission exactement les mêmes que ceux des anneaux sombres par réflexion. On remarque notamment que le centre des anneaux de Newton est clair par transmission et sombre par réflexion. Comme on utilise de la lumière blanche, les anneaux d'interférence sont entourés de franges colorées.

INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON

P5.3.4.1
Montage d'un interféromètre de
Michelson sur la plaque de base pour
optique laser

P5.3.4.2
Détermination de la longueur d'onde
d'un faisceau laser He-Ne à l'aide d'un
interféromètre de Michelson



Montage d'un interféromètre de Michelson sur la plaque de base pour optique laser (P5.3.4.1)

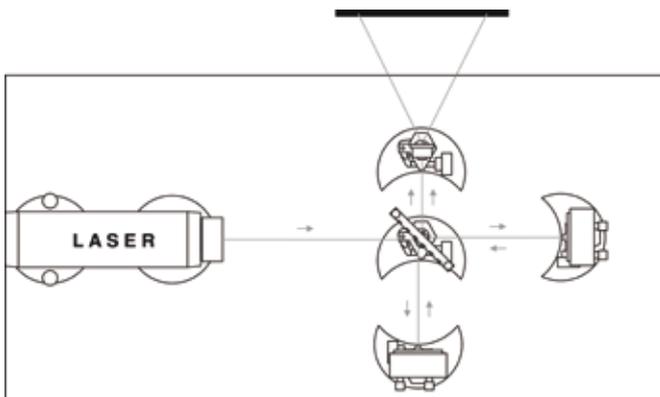
N° de cat.	Désignation	P5.3.4.1	P5.3.4.2
473 40	Plaque de base pour optique laser	1	1
471 830	Laser He-Ne à polarisation linéaire	1	1
473 411	Porte-laser	1	1
473 421	Pied pour optique	4	5
473 432	Lame séparatrice 50 %	1	1
473 431	Porte-lame séparatrice	1	1
473 461	Miroir plan à réglage précis	2	2
473 471	Lentille sphérique $f = 2,7 \text{ m}$	1	1
441 53	Écran, translucide	1	1
300 11	Socle	1	1
311 02	Règle métallique, 1 m	1	1
473 48	Mécanisme de réglage de précision		1

Un interféromètre de Michelson fonctionne de la manière suivante: un faisceau lumineux cohérent est scindé en deux par un composant optique. Chacun des sous-faisceaux suit une trajectoire différente, ils se réfléchissent sur eux-mêmes et finissent par se rejoindre. Etant donné que les deux sous-faisceaux ont un rapport des phases fixe, une figure d'interférence peut se former par superposition. Si l'on modifie maintenant le chemin optique d'un sous-faisceau, alors le rapport des phases et la figure d'interférence changent eux aussi.

A partir du changement de la figure d'interférence, il est alors possible de déterminer pour un indice de réfraction constant des écarts du trajet géométrique. Si le trajet géométrique demeure inchangé, alors on peut étudier des changements de l'indice de réfraction résultant par ex. des variations de la pression, de la température et de la densité.

Dans l'expérience P5.3.4.1, on monte l'interféromètre de Michelson sur une plaque de base pour optique laser insensible aux secousses. Le montage convient parfaitement pour la mise en évidence de secousses mécaniques et de stries d'air.

Dans l'expérience P5.3.4.2, la longueur d'onde d'un laser He-Ne est déterminée d'après le changement de la figure d'interférence en déplaçant le miroir de l'interféromètre et le déplacement Δs du miroir. Pendant ce déplacement, les franges d'interférence défilent sur l'écran d'observation. Pour l'exploitation, on compte soit les maxima, soit les minima d'intensité défilant en un point précis sur l'écran d'observation pendant le déplacement du miroir plan.



Mise en place de l'interféromètre de Michelson (P5.3.4.1).



INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON

P5.3.4.3

Détermination de la longueur d'onde d'un faisceau laser He-Ne à l'aide d'un interféromètre de Michelson - montage sur un banc d'optique

P5.3.4.4

Détermination de la cohérence temporelle et de la largeur de la raie spectrale à l'aide de l'interféromètre de Michelson

P5.3.4.5

Etude de l'amplification de raies spectrales en fonction de la pression à l'aide d'un interféromètre de Michelson

P5.3.4.6

Détermination du dédoublement de deux raies spectrales à l'aide d'un interféromètre de Michelson

Détermination de la cohérence temporelle et de la largeur de la raie spectrale à l'aide de l'interféromètre de Michelson (P5.3.4.4)

N° de cat.	Désignation	P5.3.4.3	P5.3.4.4	P5.3.4.5	P5.3.4.6
471 830	Laser He-Ne à polarisation linéaire	1			
460 32	Banc d'optique à profil normalisé, 1 m	1	1	1	1
460 373	Cavalier 60/50 pour l'optique	1	1	1	1
460 374	Cavalier 90/50 pour l'optique	5	7	7	7
471 88	Lame séparatrice	1	1	1	1
473 461	Miroir plan à réglage précis	2	2	2	2
460 380	Bras de rallonge	1	1	1	1
460 01	Lentille dans monture, $f = +5$ mm	1			
473 48	Mécanisme de réglage de précision	1	1	1	1
441 53	Écran, translucide	1	1	1	1
300 11	Socle	1	1	1	1
311 02	Règle métallique, 1 m	1			
451 062	Lampe spectrale Hg 100		1	1	1
451 16	Carter pour lampes spectrales		1	1	1
451 30	Bobine de self universelle 230 V, 50 Hz		1	1	1
460 26	Diaphragme à iris		2	2	2
468 07	Filtre monochromatique, jaune-vert		1	1	
460 22	Monture-support avec pinces à ressort		1	1	1
451 15	Lampe haute pression au mercure, dans boîtier			1	
451 19	Douille E27, connecteur multiple			1	
468 30	Filtre monochromatique, jaune				1

En supplément, l'interféromètre de Michelson permet l'analyse de la cohérence temporelle d'une source de lumière. Le laps de temps Δt , au cours duquel on peut observer une figure d'interférence, s'appelle le temps de cohérence. La distance D_{sC} parcourue par la lumière dans le temps de cohérence est la distance de cohérence. La distance de cohérence typique est de quelques micromètres pour les ampoules électriques, de quelques millimètres pour les lampes spectrales et bien plusieurs mètres pour un laser.

En plus, le temps de cohérence Δt_C est lié à la largeur spectrale D_n resp. DI de la source de lumière.

Dans l'expérience P5.3.4.3, on monte l'interféromètre de Michelson sur un banc d'optique. La longueur d'onde d'un laser He-Ne est déterminée d'après le changement de la figure d'interférence en déplaçant le miroir de l'interféromètre et le déplacement Δs du miroir.

Dans l'expérience P5.3.4.4 on détermine d'abord la longueur d'onde l de la raie spectrale verte d'une lampe spectrale Hg. Pour mesurer la distance de cohérence on détermine les positions du miroir plan déplaçable, auxquelles on peut tout juste observer une interférence. De la différence de la distance on détermine la distance de cohérence Δs_C , le temps de cohérence Δt_C et la largeur $D\Delta$ de la raie spectrale.

Dans l'expérience P5.3.4.5 on détermine les longueurs de cohérence et les largeurs spectrales de la raie spectrale verte d'une lampe au mercure et d'une lampe à vapeur de mercure pour comparer les résultats. Le résultat de la pression plus élevée dans la lampe à vapeur est un élargissement net de la raie spectrale ce qui se manifeste par une longueur de cohérence nettement plus courte.

L'expérience P5.3.4.6 se consacre à la détermination de la longueur d'onde l et la scission des lignes DI du doublet jaune d'une lampe à vapeur de mercure. La superposition cohérente de deux sous-faisceaux de deux longueurs d'ondes différentes λ_1 et λ_2 proches l'une de l'autre mène à une figure d'interférence. Certaines différences de longueurs d'ondes montrent un contraste assez fort entre anneaux clairs et foncés, tandis que pour d'autres le contraste disparaît complètement.

AUTRES TYPES
D'INTERFÉROMÈTRES

P5.3.5.1
Montage d'un interféromètre de
Mach-Zehnder sur la plaque de base
pour optique laser

P5.3.5.2
Mesure de l'indice de réfraction de
l'air à l'aide d'un interféromètre de
Mach-Zehnder



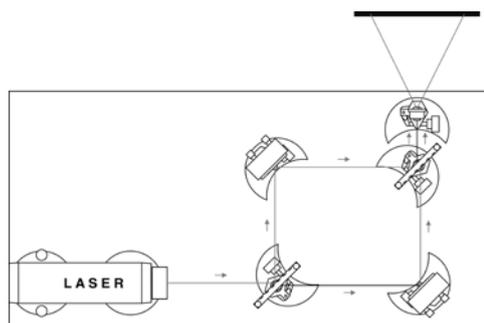
Mesure de l'indice de réfraction de l'air à l'aide d'un interféromètre de Mach-Zehnder (P5.3.5.2)

N° de cat.	Désignation	P5.3.5.1	P5.3.5.2
473 40	Plaque de base pour optique laser	1	1
471 830	Laser He-Ne à polarisation linéaire	1	1
473 411	Porte-laser	1	1
473 421	Pied pour optique	5	6
473 431	Porte-lame séparatrice	2	2
473 432	Lame séparatrice 50 %	2	2
473 461	Miroir plan à réglage précis	2	2
473 471	Lentille sphérique $f = 2,7$ m	1	1
441 53	Écran, translucide	1	1
300 11	Socle	1	1
311 02	Règle métallique, 1 m	1	1
473 485	Chambre à vide		1
375 58	Pompe à vide manuelle		1
667 186	Tuyau pour vide, 8 mm \varnothing		1
604 520	Raccord réducteur avec embout olivaire		1
300 02	Pied en V, petit		1
666 555	Pince de serrage universelle 0...80 mm		1

Un interféromètre de Mach-Zehnder fonctionne de la manière suivante: un faisceau lumineux cohérent est scindé en deux par un composant optique. Les sous-faisceaux lumineux ainsi obtenus sont déviés par un miroir puis finissent par se rejoindre. Comme le rapport des phases des deux sous-faisceaux lumineux est fixe, une figure d'interférence peut se former par superposition. Si on change maintenant le chemin optique d'un faisceau lumineux, le rapport des phases et la figure d'interférence changent eux aussi. Le changement de la figure d'interférence permet de tirer des conclusions quant à la modification du chemin optique. Contrairement à l'interféromètre de Michelson, les sous-faisceaux lumineux ne se réfléchissent pas sur eux-mêmes, mais suivent une trajectoire différente; les expériences sont donc plus simples et plus faciles à comprendre. Par contre, l'inconvénient est la mise au point plus difficile de l'interféromètre de Mach-Zehner.

Dans l'expérience P5.3.5.1, on monte l'interféromètre de Mach-Zehnder sur une plaque de base pour optique laser insensible aux secousses.

Dans l'expérience P5.3.5.2, on détermine l'indice de réfraction de l'air. Pour cela, on place une chambre à vide dans la trajectoire d'un sous-faisceau de l'interféromètre de Mach-Zehnder. En évacuant lentement l'air contenu dans la chambre, on fait varier la longueur du chemin optique du sous-faisceau considéré.



Montage d'un interféromètre de Mach-Zehnder sur la plaque de base pour optique laser (P5.3.5.1)

**AUTRES TYPES
D'INTERFÉROMÈTRES**

P5.3.5.3

Détermination de la longueur d'onde d'un faisceau laser He-Ne à l'aide d'un interféromètre de Fabry-Perot



Détermination de la longueur d'onde d'un faisceau laser He-Ne à l'aide d'un interféromètre de Fabry-Perot (P5.3.5.3)

N° de cat.	Désignation	P5.3.5.3
473 40	Plaque de base pour optique laser	1
471 830	Laser He-Ne à polarisation linéaire	1
473 411	Porte-laser	1
473 421	Pied pour optique	5
473 432	Lame séparatrice 50 %	2
473 431	Porte-lame séparatrice	2
473 461	Miroir plan à réglage précis	1
473 48	Mécanisme de réglage de précision	1
473 471	Lentille sphérique $f = 2,7 \text{ m}$	1
441 53	Écran, translucide	1
300 11	Socle	1
311 02	Règle métallique, 1 m	1

Outre les interféromètres de Michelson et de Mach-Zehnder, d'autres géométries permettant de diviser et de recombinaer les faisceaux lumineux sont aussi possibles. Une variante fonctionnelle est l'interféromètre de Fabry-Perot.

L'expérience P5.3.5.3 consiste à disposer les composants les uns derrière les autres sur la plaque de base pour laser de manière à réaliser un interféromètre de Fabry-Perot avec deux miroirs parallèles. Le premier miroir semi-transparent divise le faisceau lumineux, le deuxième miroir réfléchit la lumière et fait en sorte qu'elle se superpose avec le premier faisceau partiel. Un déplacement du deuxième miroir modifie la longueur du résonateur et donc la figure d'interférence de même qu'il permet la mesure de la longueur d'onde de la lumière laser.

HOLOGRAPHIE EN LUMIÈRE BLANCHE PAR RÉFLEXION

P5.3.6.1

Réalisation d'hologrammes en lumière blanche par réflexion sur la plaque de base pour optique laser

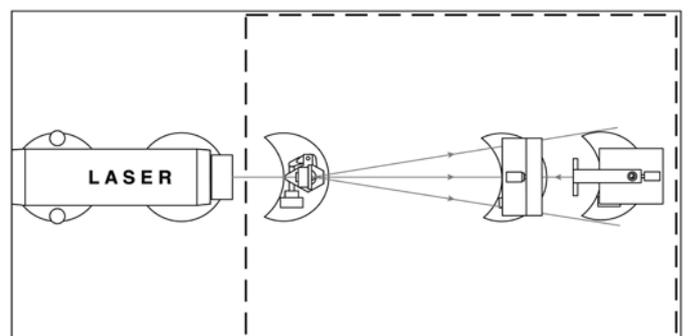


Réalisation d'hologrammes en lumière blanche par réflexion sur la plaque de base pour optique laser (P5.3.6.1)

N° de cat.	Désignation	P5.3.6.1
473 40	Plaque de base pour optique laser	1
471 830	Laser He-Ne à polarisation linéaire	1
473 411	Porte-laser	1
473 421	Pied pour optique	3
473 441	Porte-film	1
473 451	Porte-objet	1
473 471	Lentille sphérique $f = 2,7 \text{ m}$	1
311 02	Règle métallique, 1 m	1
663 615	Connecteur multiprise 5 prises à contact de protection	1
313 27	Chronomètre manuel, 60s/0,2s	1
649 11	Casier de rangement, 86 x 86 x 26 mm, lot de 6	1
661 234	Flacon à fermeture à vis, PE, 1000 ml, col large	3
667 016	Ciseaux, 200 mm, bouts pointus	1
473 448	Film pour l'holographie, 3000 lignes/mm	1
473 446	Accessoires pour chambre noire	1
473 444	Produits chimiques utilisés en photographie	1
671 8910	Hydrate de fer (III) nitrate à 9 molécul	1
672 4910	Bromure de potassium, 100 g	1

Un hologramme de réflexion en lumière blanche est réalisé à partir d'un rayon laser élargi qui traverse un film et qui éclaire un objet placé derrière. La lumière réfléchi sur la surface de l'objet est renvoyée sur le film où elle se superpose aux ondes lumineuses du rayon laser initial. Le film se compose d'une émulsion photosensible d'épaisseur suffisante. A l'intérieur du film, des ondes stationnaires se forment par interférence: il s'agit d'une succession de noeuds et de ventres distants de $\lambda/4$. Contrairement aux noeuds, les ventres sont éclairés. Des couches semi-réfléchissantes d'argent métallique se forment aux endroits éclairés. Pour la reconstruction, un hologramme terminé est éclairé avec de la lumière blanche. Le laser n'est plus nécessaire. Les ondes lumineuses réfléchies sur les couches semi-réfléchissantes se superposent de façon à avoir les mêmes propriétés que les ondes provenant initialement de l'objet. L'observateur peut voir l'image d'un objet en trois dimensions. Des faisceaux lumineux, issus de différentes couches, deviennent plus intenses uniquement lorsqu'ils sont en phase. La condition pour la concordance des phases n'est remplie que pour une longueur d'onde précise. Dans le cas de la reconstruction d'image, l'hologramme sélectionne alors la longueur d'onde du laser (par mis le spectre de la lumière blanche). En conséquence, on peut effectuer la reconstruction de l'image avec de la lumière blanche.

Dans l'expérience P5.3.6.1, on enregistre des hologrammes de réflexion en lumière blanche. On utilise un laser de classe de protection 2 pour ne pas inutilement mettre en danger l'œil de l'utilisateur. Suivant le traitement photochimique du film exposé, il est possible de réaliser des hologrammes d'amplitude et des hologrammes de phase.



Montage expérimental pour la réalisation d'hologrammes de transmission (P5.3.7.1)



HOLOGRAPHIE PAR TRANSMISSION

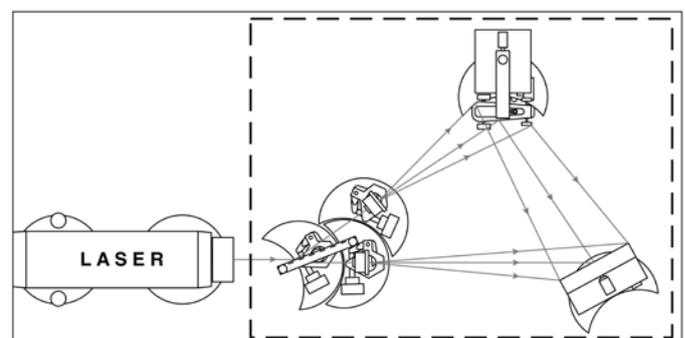
P5.3.7.1
Réalisation d'hologrammes par transmission sur la plaque de base pour optique laser

Réalisation d'hologrammes par transmission sur la plaque de base pour optique laser (P5.3.7.1)

N° de cat.	Désignation	P5.3.7.1
473 40	Plaque de base pour optique laser	1
471 830	Laser He-Ne à polarisation linéaire	1
473 411	Porte-laser	1
473 421	Pied pour optique	5
473 432	Lame séparatrice 50 %	1
473 431	Porte-lame séparatrice	1
473 441	Porte-film	1
473 451	Porte-objet	1
473 471	Lentille sphérique $f = 2,7 \text{ m}$	2
311 02	Règle métallique, 1 m	1
663 615	Connecteur multiprise 5 prises à contact de protection	1
313 27	Chronomètre manuel, 60s/0,2s	1
649 11	Casier de rangement, 86 x 86 x 26 mm, lot de 6	1
661 234	Flacon à fermeture à vis, PE, 1000 ml, col large	3
667 016	Ciseaux, 200 mm, bouts pointus	1
473 448	Film pour l'holographie, 3000 lignes/mm	1
473 446	Accessoires pour chambre noire	1
473 444	Produits chimiques utilisés en photographie	1
671 8910	Hydrate de fer (III) nitrate à 9 molécules	1
672 4910	Bromure de potassium, 100 g	1

Les hologrammes de transmission sont réalisés à partir d'un faisceau laser scindé en un faisceau objet et en un faisceau de référence ensuite élargis. Le faisceau objet éclaire un objet au niveau duquel il est réfléchi. La lumière réfléchie est superposée au faisceau de référence cohérent sur un film sur lequel les ondes lumineuses des deux sous-faisceaux lumineux interfèrent. Il se forme une figure d'interférence irrégulière qui ne ressemble absolument pas à l'objet reproduit. Pour la reconstruction de l'hologramme, un faisceau lumineux correspondant au faisceau de référence est diffracté par un hologramme d'amplitude de telle manière que les ondes diffractées soient pratiquement identiques aux ondes objet initiales. Pour la reconstruction de l'hologramme de phase, on se sert du déphasage des ondes de référence. Dans les deux cas, l'observateur peut alors voir l'image de l'objet en trois dimensions.

Dans l'expérience P5.3.7.1, on enregistre puis on reconstruit des hologrammes par transmission. On utilise un laser de classe de protection 2 pour ne pas inutilement mettre en danger l'oeil de l'utilisateur. Suivant le traitement photochimique du film exposé, il est possible de réaliser des hologrammes d'amplitude et des hologrammes de phase.



Montage expérimental pour la réalisation d'hologrammes de transmission (P5.3.7.1)

EXPÉRIENCES DE BASE

P5.4.1.1
Polarisation de la lumière par réflexion sur une plaque en verre

P5.4.1.2
Lois de la réflexion selon Fresnel

P5.4.1.3
Polarisation de la lumière par diffusion dans une émulsion

P5.4.1.4
Loi de Malus



Lois de la réflexion selon Fresnel (P5.4.1.2)

N° de cat.	Désignation	P5.4.1.1	P5.4.1.2	P5.4.1.3	P5.4.1.4
460 25	Plateau pour prisme	1	1	1	
450 641	Lampe halogène 12 V, 50/100W	1	1		1
450 63	Ampoule halogène 12 V/100 W, G6,35	1	1		1
450 66	Passe-vues	1	1		1
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A	1	1		1
460 26	Diaphragme à iris	1	1	1	1
472 401	Filtre polarisant	2	2	2	2
460 03	Lentille dans monture f = +100 mm	1	1		1
441 53	Écran, translucide	1			
460 317	Banc d'optique, profil S1, 0,5 m	2	2		
460 3151	Socle articulé avec échelle de lecture et noix	1	1		
460 311	Cavalier avec noix 45/65	2	1	1	1
460 312	Cavalier avec noix 45/35	4	6	5	5
500 98	Douilles d'adaptation de sécurité, noires (6)	1	1		1
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir	2	2		2
460 08	Lentille dans monture, f = +150 mm		1		
578 62	Cellule solaire STE 2/19		1		1
460 21	Support pour éléments enfichables		1		1
531 183	Multimètre numérique 3340		1		1
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge		1		1
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu		1		1
450 60	Carter de lampe avec câble			1	
450 511	Ampoules 6 V/ 30 W, E14, jeu de 2			1	
460 20	Condenseur asphérique			1	
521 210	Transformateur 6/12 V, 30 W			1	
460 04	Lentille dans monture, f = +200 mm			1	
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m			1	1

Le phénomène de polarisation apporte une preuve irrécusable du caractère transversal des ondes lumineuses. La lumière naturelle n'est pas polarisée. Elle comprend des trains d'ondes indépendants, désordonnés, chacun d'eux ayant un état de polarisation déterminé. On appelle polarisation de la lumière la sélection de trains d'ondes ayant un état de polarisation défini.

Dans l'expérience P5.4.1.1, de la lumière non polarisée se réfléchit sur une surface de verre: il s'avère en regardant à travers un analyseur que la lumière réfléchie est au moins partiellement polarisée. La polarisation est maximale lorsque la réflexion se produit sous un angle d'incidence de Brewster α_p . D'après la relation

$$\tan \alpha_p = n$$

on obtient l'indice de réfraction n du verre.

Une étude plus précise nous mène aux lois de la réflexion selon Fresnel qui donnent le rapport de l'amplitude réfléchie sur l'amplitude incidente pour différentes directions de propagation. On vérifie quantitativement les lois dans l'expérience P5.4.1.2.

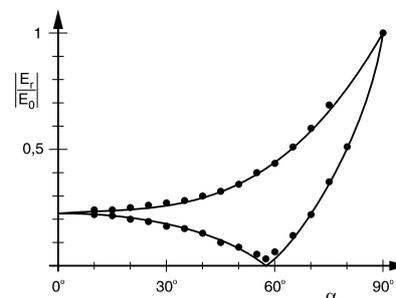
Dans l'expérience P5.4.1.3, on met en évidence le fait que la lumière non polarisée le devient par diffusion dans une émulsion, par exemple du lait dilué, et que de la lumière polarisée n'est pas diffusée uniformément dans toute les directions.

La loi de Malus fait l'objet de l'expérience P5.4.1.4. Si une lumière polarisée linéairement incide sur un analyseur, l'intensité de la lumière transmise est alors de

$$I = I_0 \times \cos^2 \alpha$$

I_0 : intensité de la lumière incidente

α : angle entre la direction de polarisation et l'analyseur



Les lois de la réflexion de Fresnel (P5.4.1.2).

BIRÉFRINGENCE

P5.4.2.1

Biréfringence et polarisation sur le spath d'Islande

P5.4.2.2

Lame quart-d'onde et lame demi-onde

P5.4.2.3

Photoélasticité: étude des répartitions de tension dans des corps soumis à une charge mécanique



Lame quart-d'onde et lame demi-onde (P5.4.2.2)

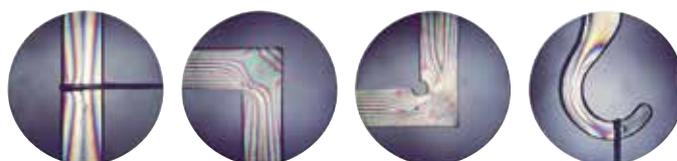
N° de cat.	Désignation	P5.4.2.1	P5.4.2.2	P5.4.2.3
472 02	Cristal de calcite biréfringent	1		
460 25	Plateau pour prisme	1		1
460 26	Diaphragme à iris	1		1
472 401	Filtre polarisant	1	2	2
460 02	Lentille dans monture, f = +50 mm	1		
460 06	Lentille dans monture, f = -100 mm	1		
441 53	Écran, translucide	1	1	1
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	1	1	1
460 311	Cavalier avec noix 45/65	2	2	1
460 312	Cavalier avec noix 45/35	5	5	8
450 641	Lampe halogène 12 V, 50/100W	1	1	1
450 63	Ampoule halogène 12 V/100 W, G6,35	1	1	1
450 66	Passe-vues	1	1	1
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A	1	1	1
500 98	Douilles d'adaptation de sécurité, noires (6)	1	1	1
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir	2	2	2
472 601	Lame quart d'onde, 140 nm		2	2
472 59	Lame demi-onde		1	
468 30	Filtre monochromatique, jaune		1	
578 62	Cellule solaire STE 2/19		1	
460 21	Support pour éléments enfichables		1	
531 183	Multimètre numérique 3340		1	
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge		1	
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu		1	
471 95	Modèles photo-élastiques, jeu de 4			1
460 08	Lentille dans monture, f = +150 mm		2	
300 11	Socle			1

La loi de la réfraction de Snell est valable dans l'hypothèse que la lumière, dans un milieu réfringent, se propage dans toutes les directions à la même vitesse. Dans les milieux biréfringents, cette condition n'est remplie que pour le rayon ordinaire d'un faisceau lumineux, la loi ne s'appliquant pas au rayon extraordinaire.

Dans l'expérience P5.4.2.1, on étudie la double réfringence du spath d'Islande. On observe que les deux sous-faisceaux formés dans le cristal sont polarisés linéairement mais que les directions de polarisation sont perpendiculaires entre elles.

Dans l'expérience P5.4.2.2, on étudie les propriétés des lames quart-d'onde et demi-onde qui permettent d'expliquer la biréfringence. On montre que l'appellation de ces lames se rapporte à la différence de marche entre le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire lors de leur passage à travers les lames.

Dans l'expérience P5.4.2.3, on détermine la valeur et la direction des déformations dans des modèles en plastique transparents. Les plastiques deviennent optiquement biréfringents sous l'influence d'une sollicitation mécanique. C'est la raison pour laquelle on peut voir les déformations dans le modèle à l'aide de lumière polarisée. On éclaire les modèles photo-élastiques par ex. dans un dispositif constitué d'un polariseur et d'un analyseur. La lumière est polarisée elliptiquement par la biréfringence dans le plastique déformé. Les endroits déformés du modèle en plastique se reconnaissent à l'éclaircissement du champ visuel. Dans un autre montage, on éclaire les modèles photo-élastiques avec de la lumière polarisée circulairement et on observe les déformations par un ensemble formé d'une lame quart-d'onde et d'un analyseur. Ici aussi, on reconnaît les endroits déformés à l'éclaircissement du champ visuel.



Photoélasticité: Etude des répartitions de tension dans des corps soumis à une charge mécanique (P5.4.2.3)

ACTIVITÉ OPTIQUE, POLARIMÉTRIE

P5.4.3.1

Rotation du plan de polarisation par le quartz

P5.4.3.2

Rotation du plan de polarisation par des solutions de sucre

P5.4.3.3

Montage d'un polarimètre à pénombre avec des éléments discrets

P5.4.3.4

Détermination de la concentration de solutions sucrées avec un polarimètre de type commercial



Rotation du plan de polarisation par des solutions de sucre (P5.4.3.2)

N° de cat.	Désignation	P5.4.3.1	P5.4.3.2	P5.4.3.3	P5.4.3.4
472 621	Quartz, parallèle	1			
472 641	Quartz, dextrogyre, vertical	1			
472 651	Quartz, lévogyre, vertical	1			
460 22	Monture-support avec pinces à ressort	1		1	
450 641	Lampe halogène 12 V, 50/100W	1	1	1	
450 63	Ampoule halogène 12 V/100 W, G6,35	1	1	1	
450 66	Passe-vues	1	1	1	
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A	1	1	1	
468 30	Filtre monochromatique, jaune	1		1	
472 401	Filtre polarisant	2	2	2	
460 03	Lentille dans monture f = +100 mm	1	1	1	
441 53	Écran, translucide	1	1	1	
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	1	1	1	
460 311	Cavalier avec noix 45/65	2	2	2	
460 312	Cavalier avec noix 45/35	4	4	5	
500 98	Douilles d'adaptation de sécurité, noires (6)	1	1	1	
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir	2	2	2	
460 25	Plateau pour prisme		1	1	
468 03	Filtre monochromatique, rouge		1		
468 07	Filtre monochromatique, jaune-vert		1		
468 11	Filtre monochromatique, bleu-violet		1		
666 963	Spatule cuillère, acier inoxydable, 120 mm		1	1	1
674 6050	D(+) saccharose, 100 g		1	1	1
688 107	Polaroids 38 mm Ø, jeu de 2			1	
688 109	Cache-diapositive 5 x 5 cm, lot de 100			1	
657 591	Polarimètre				1
664 111	Bécher DURAN, 100 ml, forme haute				1
OHC R221	Balance Compact CR221, 220 g : 0,1 g				1

On appelle activité optique le pouvoir de certaines substances à faire tourner le plan de polarisation d'une lumière polarisée linéairement lors de son passage à travers la substance. L'angle de rotation est mesuré par un polarimètre.

Dans l'expérience P5.4.3.1, on étudie l'activité optique d'un cristal portant le nom de quartz. Selon sa direction par rapport à son axe optique, le quartz est dextrogyre ou lévogyre. L'angle de rotation dépend fortement de la longueur d'onde de la lumière, raison pour laquelle on utilise un filtre de couleur jaune.

Dans l'expérience P5.4.3.2, on étudie l'activité optique d'une solution de sucre. L'angle de rotation α de solutions optiquement actives est, pour une longueur d donnée de la cuve, proportionnel à la concentration c de la solution.

$$\alpha = [\alpha] \times d$$

$[\alpha]$: pouvoir rotatoire de la solution optiquement active

Dans l'expérience P5.4.3.3, on monte un polarimètre à pénombre à partir d'éléments discrets: un polariseur et un analyseur entre lesquels on place la substance optiquement active. La moitié du champ visuel est recouverte d'une feuille de polarisation supplémentaire dont la direction de polarisation est légèrement déformée par rapport à la première. On facilite donc la mesure de l'angle de rotation.

Dans l'expérience P5.4.3.4, il s'agit de mesurer des concentrations de sucre à l'aide d'un polarimètre de type commercial et de les comparer avec les valeurs mesurées lors des expériences.



Détermination de la concentration de solutions de sucre avec un polarimètre de type commercial (P5.4.3.4)



EFFET KERR

P5.4.4.1
Étude de l'effet Kerr sur le nitrobenzène

Étude de l'effet Kerr sur le nitrobenzène (P5.4.4.1)

N° de cat.	Désignation	P5.4.4.1
473 31	Cellule de Kerr	1
450 641	Lampe halogène 12 V, 50/100W	1
450 63	Ampoule halogène 12 V/100 W, G6,35	1
450 66	Passe-vues	1
468 03	Filtre monochromatique, rouge	1
468 05	Filtre monochromatique, jaune	1
468 07	Filtre monochromatique, jaune-vert	1
468 11	Filtre monochromatique, bleu-violet	1
472 401	Filtre polarisant	2
460 03	Lentille dans monture f = +100 mm	1
460 25	Plateau pour prisme	1
441 53	Écran, translucide	1
460 32	Banc d'optique à profil normalisé, 1 m	1
460 373	Cavalier 60/50 pour l'optique	6
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A	1
521 70	Alimentation haute tension 10 kV	1
501 051	Câble haute tension, 1,5 m	2
500 98	Douilles d'adaptation de sécurité, noires (6)	1
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir	2
673 9410	Nitrobenzène, 250 ml	1

J. Kerr a découvert en 1875 que des champs électriques dans des substances isotropes peuvent produire une biréfringence qui augmente quadratiquement avec l'intensité du champ électrique. Pour des raisons de symétrie, l'axe optique de la biréfringence se trouve dans la direction du champ. L'indice de réfraction normal de la substance devient n_e pour la direction d'oscillation parallèle au champ appliqué et n_o pour celle qui lui est perpendiculaire. On trouve expérimentalement la relation :

$$n_e - n_o = K \cdot \lambda \cdot E^2$$

K : constante de Kerr

λ : longueur d'onde de la lumière utilisée

E : intensité du champ électrique

Dans l'expérience P5.4.4.1, on met en évidence l'effet Kerr sur du nitrobenzène qui possède une constante de Kerr est particulièrement grande. On verse le liquide dans un petit récipient en verre dans lequel on place un condensateur à lames. Le dispositif se trouve entre deux filtres polarisants croisés et est éclairé par un faisceau lumineux polarisé linéairement. Le champ visuel est sombre lorsqu'on ne lui applique aucun champ électrique. Dans le cas contraire, il est éclairé étant donné que le faisceau lumineux est polarisé elliptiquement à la traversée d'un liquide biréfringent.

EFFET POCKELS

P5.4.5.1

Démonstration de l'effet Pockels dans un trajet conoscopique du faisceau lumineux

P5.4.5.2

Effet Pockels: transfert de l'information avec de la lumière modulée



Démonstration de l'effet Pockels dans un trajet conoscopique du faisceau lumineux (P5.4.5.1)

N° de cat.	Désignation	P5.4.5.1	P5.4.5.2
472 90	Cellule de Pockels	1	1
521 70	Alimentation haute tension 10 kV	1	1
471 830	Laser He-Ne à polarisation linéaire	1	1
460 01	Lentille dans monture, $f = +5$ mm	1	
460 02	Lentille dans monture, $f = +50$ mm	1	
472 401	Filtre polarisant	1	1
460 32	Banc d'optique à profil normalisé, 1 m	1	1
460 370	Cavalier 60/34 pour l'optique	5	4
441 53	Écran, translucide	1	
300 11	Socle	1	1
500 604	Câble de connexion de sécurité, 10 cm, noir	1	
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	1	3
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1	3
522 621	Générateur de fonctions S 12		1
578 62	Cellule solaire STE 2/19		1
460 21	Support pour éléments enfichables		1
532 20	Amplificateur CA/CC 30 W		1
587 08	Haut-parleur à large bande		1
500 98	Douilles d'adaptation de sécurité, noires (6)		1
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu		2

On appelle «effet Pockels» l'apparition d'une biréfringence ou bien le changement d'une biréfringence déjà existante dans un champ électrique, linéairement avec l'intensité du champ électrique. Ce phénomène se rapproche de l'effet Kerr mais en raison de sa dépendance linéaire de l'intensité du champ électrique, l'effet Pockels ne peut survenir, pour des raisons de symétrie, que dans les cristaux sans centre de symétrie.

Dans l'expérience P5.4.5.1, on démontre l'effet Pockels sur un cristal de niobate de lithium placé dans le trajet conoscopique d'un faisceau lumineux. On éclaire le cristal avec un faisceau lumineux divergent, polarisé linéairement et on observe la lumière qui le traverse derrière un analyseur croisé. L'axe optique du cristal déjà biréfringent sans aucun champ électrique, est parallèle à la surface d'incidence et à la surface de sortie, raison pour laquelle une figure d'interférence est formée de deux groupes d'hyperboles tournés l'un par rapport à l'autre de 90° . Les franges claires de la figure d'interférence sont le résultat de faisceaux lumineux pour lesquels la différence Δ des chemins optiques du rayon extraordinaire et du rayon ordinaire dans le cristal est un multiple entier de la longueur d'onde λ . L'effet Pockels change la différence des indices de réfraction principaux $n_o - n_e$. Il s'ensuit un changement de la position des franges d'interférence. Si on applique la dite tension de demi onde U_1 , Δ change d'une demi-longueur d'onde. Les franges d'interférence sombres se déplacent vers la position des franges claires et vice-versa. Le processus se répète à chaque nouvelle augmentation de la tension de valeur U_λ .

Dans l'expérience P5.4.5.2, on présente l'application de la cellule de Pockels pour la transmission de signaux à fréquences vocales. On superpose le signal de quelques volts d'amplitude d'un générateur de fonctions à une tension continue appliquée au cristal de la cellule de Pockels. On mesure l'intensité de la lumière transmise par la cellule de Pockels avec une pile solaire. L'intensité lumineuse est modulée avec la fréquence superposée. Le signal reçu est amené maintenant à un haut-parleur par l'intermédiaire d'un amplificateur et c'est ainsi qu'il est rendu audible.

EFFET FARADAY

P5.4.6.1

Effet Faraday: détermination de la constante de Verdet pour le flint en fonction de la longueur d'onde



Effet Faraday: détermination de la constante de Verdet pour le flint en fonction de la longueur d'onde (P5.4.6.1)

N° de cat.	Désignation	P5.4.6.1
560 482	Parallélépipède rectangle en flint avec support	1
460 381	Cavalier large à filetage	1
562 11	Noyau en U avec joug	1
560 31	Pièces polaires perforées, paire	1
562 13	Bobine à 250 spires	2
450 641	Lampe halogène 12 V, 50/100W	1
450 63	Ampoule halogène 12 V/100 W, G6,35	1
450 66	Passe-vues	1
468 05	Filtre monochromatique, jaune	1
468 09	Filtre monochromatique, bleu-vert	1
468 11	Filtre monochromatique, bleu-violet	1
468 13	Filtre monochromatique, violet	1
460 02	Lentille dans monture, f = +50 mm	1
472 401	Filtre polarisant	2
441 53	Écran, translucide	1
460 32	Banc d'optique à profil normalisé, 1 m	1
460 373	Cavalier 60/50 pour l'optique	5
521 551	Alimentation CA/CC 0...24 V/0...10 A	1
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1
524 0381	Sonde B combinée S	1
501 11	Câble rallonge, à 15 pôles	1
300 02	Pied en V, petit	1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	1
301 01	Noix Leybold	1
500 98	Douilles d'adaptation de sécurité, noires (6)	1
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	1
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir	2
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	1
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1

Les substances transparentes, isotropes deviennent optiquement actives dans un champ magnétique, c.-à-d. que le plan de polarisation de la lumière polarisée linéairement tourne à la traversée de la substance. En 1845, *M. Faraday* découvre cet effet alors qu'il cherchait un lien entre les phénomènes magnétiques et optiques.

L'angle de rotation du plan de polarisation est proportionnel à la longueur s traversée et au champ magnétique B :

$$\Delta\varphi = V \cdot B \cdot s$$

La constante de proportionnalité V est appelée constante de Verdet. Celle-ci dépend de la longueur d'onde λ de la lumière et de la dispersion.

$$V = \frac{e}{2mc^2} \cdot \lambda \cdot \frac{dn}{d\lambda}$$

Pour le flint, on a approximativement

$$\frac{dn}{d\lambda} = \frac{1,8 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2}{\lambda^3}$$

Dans l'expérience P5.4.6.1, on calibre tout d'abord le champ magnétique à l'aide d'une sonde champ magnétique en fonction de l'intensité du courant qui traverse les électroaimants; l'effet Faraday est alors étudié sur un parallélépipède en flint. Pour améliorer la précision de mesure, on mesure à chaque fois le double de l'angle de rotation par l'inversion du champ magnétique. La proportionnalité entre l'angle de rotation et le champ magnétique ainsi que la diminution de la constante de Verdet avec la longueur d'onde λ sont vérifiées.

GRANDEURS
PHOTOMÉTRIQUES ET
PROCÉDÉS DE MESURE

P5.5.1.1
Détermination de l'intensité du rayonnement et de l'intensité lumineuse d'une lampe à halogène

P5.5.1.2
Détermination de l'intensité lumineuse en fonction de l'écartement de la source lumineuse - Mesure avec Mobile-CASSY

P5.5.1.3
Vérification de la loi du rayonnement de Lambert



Détermination de l'intensité lumineuse en fonction de l'écartement de la source lumineuse - Mesure avec Mobile-CASSY (P5.5.1.2)

N° de cat.	Désignation	P5.5.1.1	P5.5.1.2	P5.5.1.3
450 641	Lampe halogène 12 V, 50/100W	1		1
450 63	Ampoule halogène 12 V/100 W, G6,35	1		1
450 66	Passe-vues	1		
468 03	Filtre monochromatique, rouge	1		
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A	1		1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1	1	1
557 36	Pile thermo-électrique de Moll	1		1
524 0401	Capteur de $\mu V S$	1		1
524 444	Capteur de Lux M	1	1	
460 03	Lentille dans monture $f = +100$ mm	1		1
460 22	Monture-support avec pinces à ressort	1	1	1
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	1	1	
460 311	Cavalier avec noix 45/65	1	1	1
460 3112	Cavalier avec noix 75/65	1		1
500 98	Douilles d'adaptation de sécurité, noires (6)	1		1
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir	2		2
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	1		1
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1		1
450 60	Carter de lampe avec câble		1	
450 511	Ampoules 6 V/ 30 W, E14, jeu de 2		1	
521 210	Transformateur 6/12 V, 30 W		1	
460 312	Cavalier avec noix 45/35		1	2
450 681	Ampoule halogène 12 V/500 W, G6,35			1
460 26	Diaphragme à iris			1
460 317	Banc d'optique, profil S1, 0,5 m			2
460 3151	Socle articulé avec échelle de lecture et noix			1

Il existe deux groupes de grandeurs physiques permettant de caractériser la luminosité des sources lumineuses: les grandeurs radiométriques qui décrivent l'émission d'énergie par la mesure ainsi que les grandeurs photométriques qui décrivent la luminosité perçue de manière subjective tout en considérant la sensibilité spectrale de l'oeil humain. L'éclairement énergétique E_e , c.-à-d. la puissance Φ_e rayonnée par unité de surface, appartient au premier groupe. Son unité est le watt par m^2 . La grandeur photométrique correspondante est l'éclairement lumineux E_c -à-d. le flux lumineux délivré par unité de surface. Son unité est le lumen par m^2 (ou lux).

Dans l'expérience P5.5.1.1, on mesure l'éclairement énergétique à l'aide de la pile thermoélectrique de Moll et l'éclairement lumineux avec le capteur de lumière. L'élément photoélectrique du luxmètre est adapté au moyen d'un filtre monté en série à la sensibilité spectrale $V(\lambda)$ de l'œil humain. Une lampe à halogène sert de source lumineuse. Une grande partie de la lumière visible de son spectre est absorbée à l'aide d'un filtre coloré et la composante infrarouge du rayonnement est, quant à elle, absorbée par un filtre anticalorique.

Dans l'expérience P5.5.1.2, on met en évidence le fait que l'éclairement lumineux dépend du carré de la distance séparant une source lumineuse ponctuelle et la surface éclairée.

L'étude de la distribution angulaire du rayonnement réfléchi d'une surface réfléchissant de manière diffuse, par exemple, du papier mâte blanc, fait l'objet de l'expérience P5.5.1.3. Malgré le fait que la surface apparente varie avec le cosinus de l'angle d'observation, cette surface semble être de toutes parts uniformément claire aux yeux de l'observateur. La variation de l'intensité du rayonnement en fonction du cosinus est décrite par la loi du rayonnement de Lambert :

$$E_e(\phi) = E_e(0) \cdot \cos \phi$$



Détermination de l'intensité lumineuse en fonction de la distance à la source lumineuse - Mesure avec Mobile-CASSY (P5.5.1.2).



LOIS DU RAYONNEMENT

P5.5.2.1

Loi de Stefan-Boltzmann: influence de la température sur l'intensité du rayonnement d'un « corps noir »

P5.5.2.2

Loi de Stefan-Boltzmann: influence de la température sur l'intensité du rayonnement d'un « corps noir » - Tracé et évaluation avec CASSY

P5.5.2.3

Vérification des lois du rayonnement avec le cube de Leslie

Loi de Stefan-Boltzmann: influence de la température sur l'intensité du rayonnement d'un « corps noir » (P5.5.2.1)

N° de cat.	Désignation	P5.5.2.1	P5.5.2.2	P5.5.2.3
555 81	Four électrique tubulaire, 230 V	1	1	
389 43	Corps noir	1	1	
502 061	Boîte de jonction de sécurité avec mise à la terre	1	1	
555 84	Support pour four électrique tubulaire	1	1	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1		1
529 676	Sonde de température NiCr-Ni, 1,5 mm, type K	1	1	1
524 0401	Capteur de μ V S	1	1	1
557 36	Pile thermo-électrique de Moll	1	1	1
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	1	1	1
460 311	Cavalière avec noix 45/65	2	2	
460 3113	Cavalière avec noix 105/65	2	2	2
460 380	Bras de rallonge	1	1	
666 555	Pince de serrage universelle 0...80 mm	1	1	
500 98	Douilles d'adaptation de sécurité, noires (6)	1	1	1
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	1	1	1
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1	1	1
388 181	Pompe submersible	1*	1*	
521 231	Transformateur variable TBT 3/6/9/12 V	1*	1*	
667 194	Tuyau silicone 7 mm \varnothing , 1 m	1*	1*	
604 3131	Bidon à col large 10 l	1*	1*	
524 013	Sensor-CASSY 2		1	
524 220	CASSY Lab 2		1	
524 0673	Connecteur adaptateur NiCr-Ni S, type K		1	
389 261	Cube de Leslie avec agitateur			1
301 01	Noix Leybold			1
303 25	Thermoplongeur			1
664 117	Bécher DURAN, 1000 ml, forme haute			1
665 009	Entonnoir PP 75 mm \varnothing			1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		1	

* complément recommandé

La puissance totale rayonnée M_B d'un corps noir augmente proportionnellement à la quatrième puissance de sa température absolue T (loi de Stefan-Boltzmann) :

$$M_B = \sigma \cdot T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4} : \text{ constante de Stefan-Boltzmann}$$

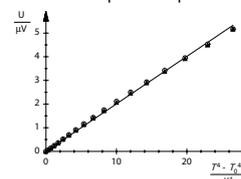
Cette puissance M rayonnée est plus faible pour les autres corps. Elle dépend de la nature de la surface du corps. On désigne par ε le degré d'émission du corps:

$$\varepsilon = \frac{M}{M_B}$$

M : puissance rayonnée du corps

Dans les expériences P5.5.2.1 et P5.5.2.2, on se sert comme corps noir d'un four muni d'un cylindre en laiton bruni. On chauffe ce cylindre dans le four à la température désirée pouvant varier de 300 à 750 K. Un thermocouple sert à mesurer la température. On place un diaphragme susceptible d'être refroidi éventuellement avec de l'eau devant le four de façon à ce que seul le rayonnement calorifique du cylindre en laiton bruni soit mesuré. Cette mesure est effectuée par une pile thermo-électrique de Moll dont la tension de sortie est une grandeur relative à la puissance M rayonnée. Cette pile peut se raccorder soit à un microvoltmètre, soit à l'interface ordinateur CASSY par l'intermédiaire d'un adaptateur μ V. Dans le premier cas, la mesure est réalisée manuellement, point par point, dans le deuxième cas, il est possible de procéder à une mesure et à une exploitation assistées par ordinateur, le but de l'exploitation étant de vérifier la loi de Stefan-Boltzmann.

Dans l'expérience P5.5.2.3, on a recours au cube de Leslie. Il possède 4 faces différentes: métallique mate, métallique polie, blanche et noire que l'on peut porter à une température de presque 100 °C en le remplissant avec de l'eau bouillante. On mesure le rayonnement calorifique émis par les faces du cube au fur et à mesure que la température baisse. L'intérêt de cette exploitation est de comparer le pouvoir émissif des faces du cube.

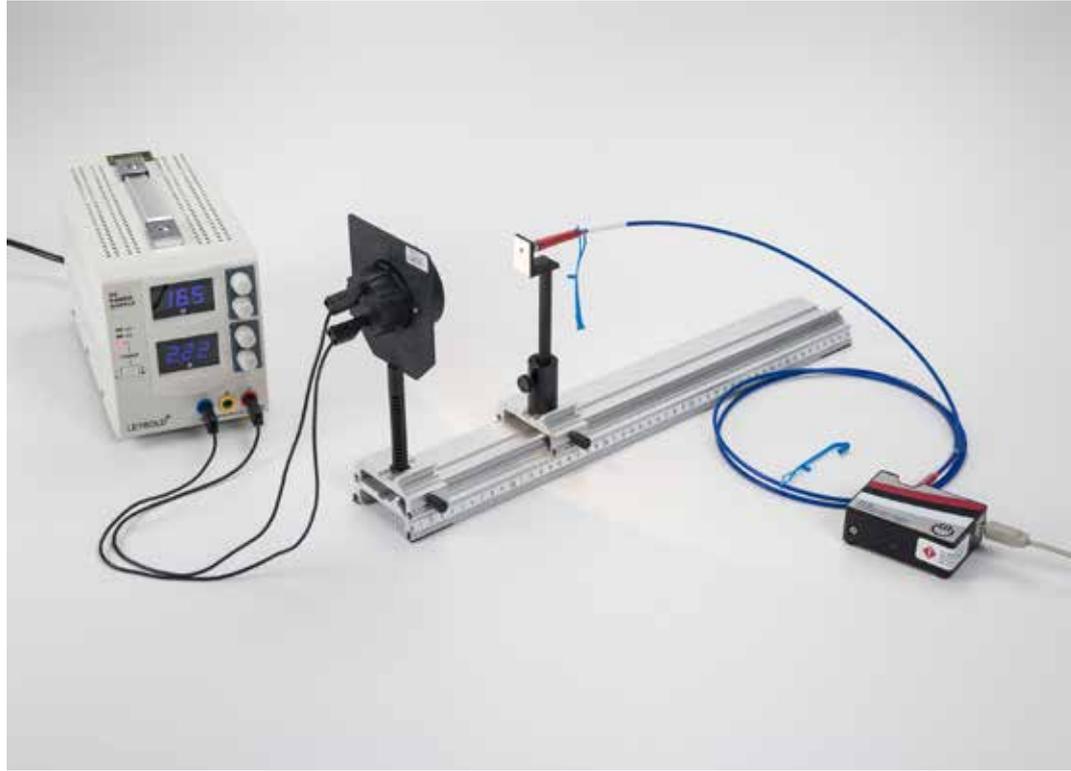


Loi de Stefan-Boltzmann: mesure de l'intensité du rayonnement d'un "corps noir" en fonction de la température (P5.5.2.1).

LOIS DU RAYONNEMENT

P5.5.2.4

La loi du rayonnement de Wien -
enregistrement spectrale de radiation
du corps noir



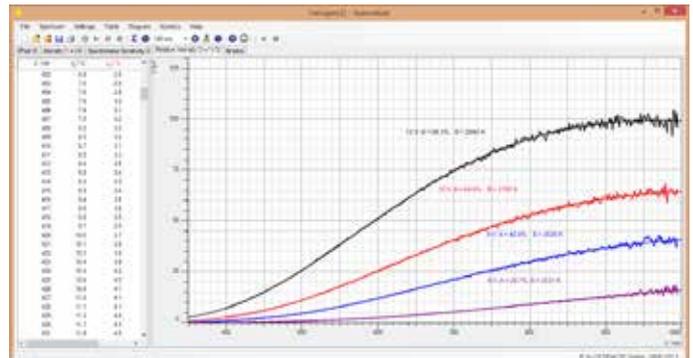
La loi du rayonnement de Wien - enregistrement spectrale de radiation du corps noir (P5.5.2.4)

N° de cat.	Désignation	P5.5.2.4
467 251	Spectromètre compact, physique	1
460 251	Support pour fibres	1
459 032	Lampe halogène 12 V/20 W	1
521 546	Alimentation CC 0...16 V/0...5 A	1
460 317	Banc d'optique, profil S1, 0,5 m	1
460 311	Cavalier avec noix 45/65	1
460 313	Cavalier avec colonne de fixation	1
501 451	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, noirs, paire	1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

Dans l'expérience P5.5.2.4, un conducteur électrique d'une lampe à incandescence est chauffé à l'aide du courant électrique jusqu'à incandescence. Le spectre émis est continue et peut être décrit à l'aide de la loi de Planck. Le maximum de la longueur d'onde se déplace vers les petites longueurs d'onde lorsque la température T augmente, selon la loi de Wien

$$\lambda_{\text{max}} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} / T,$$

en même temps qu'augmente la valeur maximale de la longueur d'onde. Pour des températures entre 2300 et 2900 K, le maximum de la longueur d'onde des lampes à incandescences se situe dans l'intervalle spectral ultraviolet. Les lampes halogènes ont elles une température de 3000 K. Dans l'expérience, les spectres d'une lampe halogène sont représentés à différentes puissances. En indiquant la température de couleur à une tension nominale de 12 V, on peut déterminer la dépendance de la longueur d'onde par rapport à la sensibilité du spectromètre et corriger la représentation du parcours de l'intensité. Ensuite, la tension aux bornes de la lampe halogène est progressivement réduite. En adaptant une „fit function", on peut déterminer chaque température de couleur de la lampe.



L'émission spectrale d'une ampoule à différentes températures (P5.5.2.4).



MESURE SELON FOUCAULT ET MICHELSON

P5.6.1.1
Détermination de la vitesse de la lumière selon la méthode du miroir tournant de Foucault et Michelson - Mesure du déplacement de l'image en fonction de la vitesse de rotation du miroir

Détermination de la vitesse de la lumière selon la méthode du miroir tournant de Foucault et Michelson - Mesure du déplacement de l'image en fonction de la vitesse de rotation du miroir (P5.6.1.1)

N° de cat.	Désignation	P5.6.1.1
476 40	Miroir tournant	1
471 830	Laser He-Ne à polarisation linéaire	1
463 20	Miroir de surface	1
460 12	Lentille dans monture, f = +5 m	1
471 88	Lame séparatrice	1
460 22	Monture-support avec pinces à ressort	1
311 091	Règlette en verre 50 mm	1
521 40	Transformateur variable, 0 ... 250 V	1
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1
559 921	Détecteur semi-conducteur	1
501 02	Câble HF, 1 m	1
501 10	Raccord droit BNC	1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø	1
300 44	Tige 100 cm, 12 mm Ø	1
300 01	Pied en V, grand	1
300 02	Pied en V, petit	4
300 11	Socle	1
301 01	Noix Leybold	2
301 09	Noix double S	1
311 02	Règle métallique, 1 m	1

Un procédé proposé par *L. Foucault* en 1850 puis optimisé en 1878 par *A. A. Michelson* permet de mesurer la vitesse de propagation de la lumière selon la méthode du miroir tournant: un laser sert ici de source lumineuse. Le faisceau laser est dévié sur un miroir fixe en bout de dispositif, par un miroir tournant. Lorsque le miroir tournant est au repos, le miroir en bout de dispositif réfléchit la lumière de manière à ce qu'elle soit renvoyée en suivant le même chemin. Une partie de cette lumière est réfléchiée par une lame séparatrice sur une réglette en verre graduée. Une lentille forme la source lumineuse sur le miroir en bout de dispositif et l'image de la source lumineuse sur la réglette graduée. Etant donné que le miroir tournant se trouve dans le foyer de la lentille, le faisceau lumineux principal entre la lentille et le miroir en bout de dispositif évolue parallèlement à l'axe optique de la lentille.

Dès que le miroir tournant tourne à une fréquence ν élevée, on observe un déplacement Δx de l'image sur la réglette graduée: pendant le temps

$$\Delta t = \frac{2a}{c}$$

mis par la lumière pour effectuer un aller et un retour entre le miroir tournant et le miroir fixe. Le miroir tournant tourne d'un angle

$$\Delta \alpha = 2\pi\nu \cdot \Delta t$$

Le déplacement de l'image est alors de :

$$\Delta x = 2\Delta \alpha \cdot a$$

d'où la vitesse de la lumière :

$$c = 8\pi \cdot a^2 \cdot \frac{\nu}{\Delta x}$$

Pour déterminer la vitesse de la lumière, l'expérience P5.6.1.1 mesure le décalage de l'image en fonction de la vitesse du miroir.

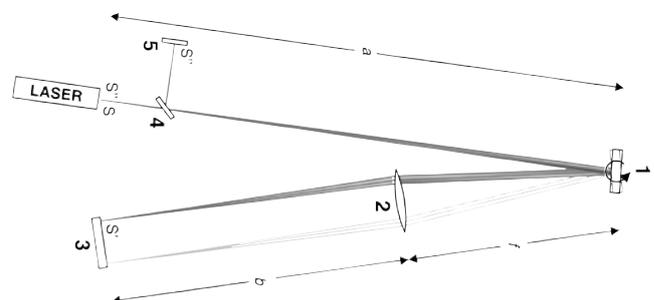


Schéma de la vitesse de la lumière au moyen de la méthode du miroir tournant selon Foucault et Michelson - Mesure du décalage de l'image en fonction de la vitesse de rotation du miroir (P5.6.1.1).

MESURE AVEC DES
IMPULSIONS LUMINEUSES
COURTES

P5.6.2.1

Détermination de la vitesse de la lumière dans l'air à partir de la distance parcourue et du temps de propagation d'une impulsion lumineuse courte



Détermination de la vitesse de la lumière dans l'air à partir de la distance parcourue et du temps de propagation d'une impulsion lumineuse courte (P5.6.2.1)

N° de cat.	Désignation	P5.6.2.1
476 50	Appareil de mesure de la vitesse de la lumière	1
460 10	Lentille dans monture, $f = +200$ mm	1
460 335	Banc d'optique à profil normalisé, 0,5 m	1
460 374	Cavalier 90/50 pour l'optique	2
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1
501 02	Câble HF, 1 m	3
311 02	Règle métallique, 1 m	1
300 01	Pied en V, grand	1
300 44	Tige 100 cm, 12 mm \varnothing	1
301 01	Noix Leybold	1

L'appareil de mesure de la vitesse de la lumière émet des impulsions lumineuses d'environ 20 ns de longueur qui sont converties en impulsions de tension après un aller et un retour sur une section de mesure connue. Elles peuvent s'observer sur un oscilloscope.

Dans l'expérience P5.6.2.1, on varie la distance parcourue par les impulsions lumineuses puis on mesure le changement du temps de propagation avec un oscilloscope. La vitesse de la lumière est le rapport du changement de la distance parcourue par le changement du temps de propagation. En alternative, on procède à la détermination absolue de la distance parcourue totale des impulsions lumineuses par le recours à une impulsion de référence. La vitesse de la lumière est dans ce cas-là le quotient de la distance parcourue par le temps de propagation. Pour le calibrage de la mesure du temps, il est possible de représenter sur l'oscilloscope un signal oscillateur commandé par quartz avec l'impulsion de mesure. La mesure du temps ne dépend alors pas de la base de temps de l'oscilloscope.

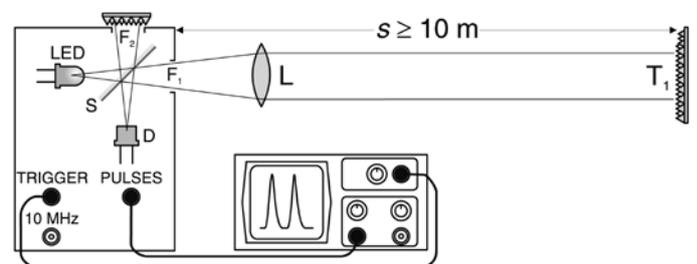


Schéma de principe pour la mesure de la vitesse de la lumière avec des impulsions courtes (P5.6.2.1)

MESURE AVEC UN SIGNAL LUMINEUX PÉRIODIQUE

P5.6.3.1

Détermination de la vitesse de la lumière avec un signal lumineux périodique sur une courte section de mesure

P5.6.3.2

Détermination de la vitesse de la lumière dans différents milieux de propagation



Détermination de la vitesse de la lumière dans différents milieux de propagation (P5.6.3.2)

N° de cat.	Désignation	P5.6.3.1	P5.6.3.2
476 301	Émetteur et récepteur de lumière	1	1
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1	1
460 08	Lentille dans monture, $f = +150$ mm	1	1
300 11	Socle	2	4
311 02	Règle métallique, 1 m	1	1
476 35	Tube à deux fenêtres		1
476 34	Corps en verre synthétique		1*
460 25	Plateau pour prisme		1*
671 9720	Éthanol, solvant, 1 l		1*
672 1210	Glycérol, 99 %, 250 ml		1*

* complément recommandé

Comme émetteur lumineux, on utilise une LED pour déterminer la vitesse de la lumière avec un signal modulé électroniquement dont l'intensité bat à la cadence de 60 MHz. Le récepteur est une photodiode qui transforme le signal lumineux en une tension alternative modulée à une fréquence de 60 MHz. Par l'intermédiaire d'un câble de connexion, on transmet au récepteur un signal de référence synchrone à un signal d'émission; au début de la mesure, on fait coïncider ce signal de référence avec le signal de réception. Puis on déplace le récepteur d'une section de mesure Δs si bien que son signal présente un déphasage

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot f_1 \cdot \Delta t \quad \text{avec } f_1 = 60 \text{ MHz}$$

à cause du temps de propagation Δt additionnel du signal lumineux. Une autre solution consisterait également à insérer dans la marche des rayons lumineux un milieu d'une plus grande densité optique. Le temps de propagation à mesurer est apparemment augmenté par une astuce électronique. Le signal de réception et le signal de référence sont respectivement combinés (multipliés) à un signal de 59,9 MHz et traversent un filtre de fréquence qui ne laisse passer que les composantes basse fréquence avec une fréquence différentielle $f_1 - f_2 = 0,1$ MHz. Le temps de propagation $\Delta t'$ multiplié par le facteur

$$\frac{f_1}{f_1 - f_2} = 600$$

correspond au déphasage.

Dans l'expérience P5.6.3.1, on mesure le temps de propagation apparent $\Delta t'$ en fonction de la section de mesure Δs et on calcule la vitesse de la lumière dans l'air selon:

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t'} \cdot \frac{f_1}{f_1 - f_2}$$

Dans l'expérience P5.6.3.2, on détermine la vitesse de la lumière dans divers milieux de propagation. Les accessoires disponibles à cet effet sont les suivants: un tube d'un mètre de long muni de deux fenêtres latérales permettant le remplissage avec de l'eau, une cuve en verre de 5 cm de large utilisée pour d'autres liquides et un corps en verre acrylique de 5 cm de large.



Déterminer la vitesse de la lumière en utilisant un signal lumineux périodique à une courte distance de mesure (P5 6 3 1).

MESURE AVEC UN SIGNAL LUMINEUX PÉRIODIQUE

P5.6.3.3

Détermination de la vitesse de la lumière avec un signal lumineux périodique sur une courte section de mesure - mesure avec un capteur de déplacement à laser et CASSY

P5.6.3.4

Détermination de la vitesse de la lumière dans différents milieux de propagation - mesure avec un capteur de déplacement à laser et CASSY



Détermination de la vitesse de la lumière avec un signal lumineux périodique sur une courte section de mesure - mesure avec un capteur de déplacement à laser et CASSY (P5.6.3.3)

N° de cat.	Désignation	P5.6.3.3	P5.6.3.4
524 013	Sensor-CASSY 2	1	1
524 220	CASSY Lab 2	1	1
524 073	Capteur de déplacement à laser S	1	1
337 116	Butoirs, paire	1	1
311 02	Règle métallique, 1 m	1	
476 34	Corps en verre synthétique		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1

Les télémètres modernes mesurent les distances à l'aide d'un rayon laser modulé périodiquement. Ils déterminent la phase entre le rayon laser émis et le rayon laser, réfléchi. Ils obtiennent avec la fréquence de modulation connue, le temps de propagation t de la lumière pour l'aller vers le réflecteur et le retour. C'est seulement après que les télémètres calculent la distance en la vitesse de la lumière connue.

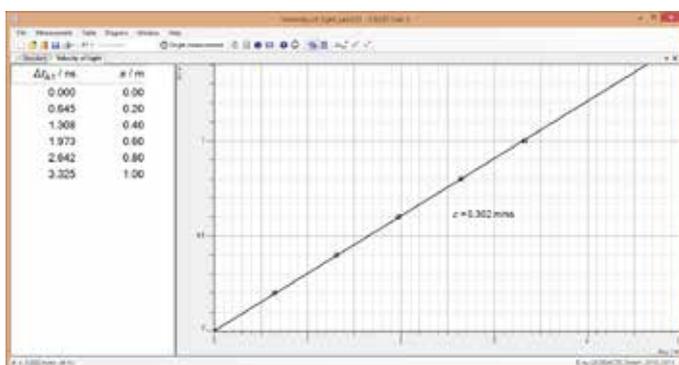
Dans l'expérience P5.6.3.3, le capteur de déplacement à laser S sert à mesurer directement le temps de propagation t . On vérifie la proportionnalité entre la distance et le temps de propagation de la lumière et on calcule la vitesse de la lumière.

Dans l'expérience P5.6.3.4 on place de l'eau et du plexiglas d'épaisseur d dans la marche des rayons pour ensuite mesurer l'augmentation du temps de propagation Δt ainsi obtenue. A l'aide de la vitesse de la lumière c dans l'air déterminée dans l'expérience précédente, il est possible de déterminer la vitesse de la lumière c_M dans la matière :

$$c_M = 2d \left(\frac{2d}{c} + \Delta t \right) = \frac{1}{\frac{1}{c} + \frac{\Delta t}{2d}}$$

Pour finir, on déterminera également l'indice de réfraction n d'après

$$n = \frac{c}{c_M} = c \cdot \left(\frac{1}{c} + \frac{\Delta t}{2d} \right) = 1 + \frac{c}{2d \cdot \Delta t}$$



Temps de transit de la lumière à différentes distances (P5.6.3.3).



SPECTROMÈTRE À PRISME

P5.7.1.1

Mesure des spectres de raies de gaz rares et de vapeurs métalliques avec un spectromètre à prisme

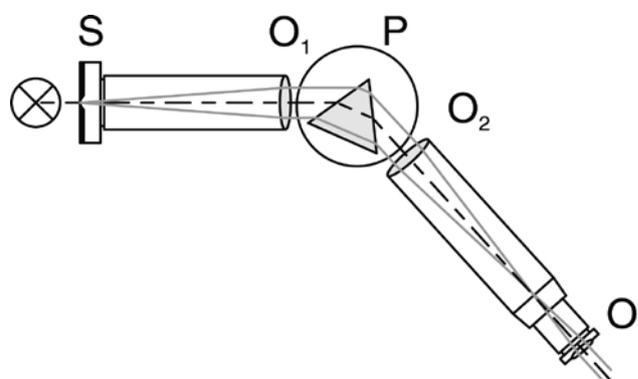
Mesure des spectres de raies de gaz rares et de vapeurs métalliques avec un spectromètre à prisme (P5.7.1.1)

N° de cat.	Désignation	P5.7.1.1
467 231	Spectromètre avec goniomètre	1
451 031	Lampe spectrale He	1
451 041	Lampe spectrale Cd	1
451 16	Carter pour lampes spectrales	1
451 30	Bobine de self universelle 230 V, 50 Hz	1
300 02	Pied en V, petit	1
451 011	Lampe spectrale Ne	1*
451 071	Lampe spectrale Hg-Cd	1*
451 081	Lampe spectrale Tl	1*
451 111	Lampe spectrale Na	1*

* complément recommandé

Pour monter un spectromètre à prisme, il suffit de placer un prisme en flint sur le plateau pour prisme du goniomètre. La lumière de la source lumineuse à étudier traverse un collimateur et incide sur le prisme en faisceau de rayons lumineux parallèles. Dans le prisme, on utilise le fait que l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde. La lumière est réfractée, chaque longueur d'onde subissant une déviation différente. Les faisceaux lumineux déviés sont observés à travers une lunette astronomique réglée sur l'infini. Elle est fixée sur un bras pivotant et il est possible de déterminer la position à une minute d'angle près. L'indice de réfraction ne dépendant pas linéairement de la longueur d'onde, il faut calibrer le spectromètre, par exemple à l'aide d'une lampe spectrale He dont les raies sont connues et réparties sur tout le domaine visible.

Dans l'expérience P5.7.1.1, on observe les raies spectrales de gaz rares et de vapeurs métalliques excités. Pour identifier les raies spectrales dans un premier temps « inconnues », on mesure leurs angles de déviation et on procède à la conversion en la longueur d'onde correspondante au moyen de la courbe de calibrage. *N.B.* : Un réseau de diffraction peut également être monté sur ce spectromètre (voir expérience suivante, P5.7.2.1).



Marche des rayons dans un spectromètre à prisme (P5.7.1.1)

SPECTROMÈTRE À RÉSEAU

P5.7.2.1

Mesure des spectres de raies de gaz rares et de vapeurs métalliques avec un spectromètre à réseau



Mesure des spectres de raies de gaz rares et de vapeurs métalliques avec un spectromètre à réseau (P5.7.2.1)

N° de cat.	Désignation	P5.7.2.1
467 231	Spectromètre avec goniomètre	1
471 23	Réseau à traits 6000/cm (Rowland)	1
451 031	Lampe spectrale He	1
451 111	Lampe spectrale Na	1
451 16	Carter pour lampes spectrales	1
451 30	Bobine de self universelle 230 V, 50 Hz	1
300 02	Pied en V, petit	1
451 011	Lampe spectrale Ne	1*
451 041	Lampe spectrale Cd	1*
451 071	Lampe spectrale Hg-Cd	1*
451 081	Lampe spectrale Tl	1*

* complément recommandé

Pour monter un spectromètre à réseau, on place la copie d'un réseau de Rowland à la place d'un prisme sur le plateau pour prisme du goniomètre. La marche des rayons dans un spectromètre à réseau est vraiment semblable à celle observée dans un spectromètre à prisme (voir P5.7.1.1). Cependant, la déviation des rayons lumineux à travers le réseau est proportionnelle à la longueur d'onde :

$$\sin \Delta\alpha = n \cdot g \cdot \lambda$$

n : ordre de diffraction

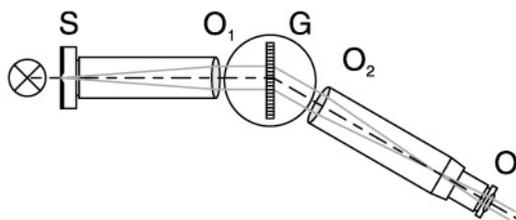
g : constante du réseau

λ : longueur d'onde

$\Delta\alpha$: angle de déviation de la raie spectrale du n -ième ordre

Il est donc possible de calculer directement les longueurs d'ondes des raies spectrales observées à partir des angles de déviation mesurés.

Dans l'expérience P5.7.2.1, on observe les raies spectrales de gaz rares et de vapeurs métalliques excités. Pour identifier les raies spectrales dans un premier temps « inconnues », on mesure leurs angles de déviation et on procède à la conversion en la longueur d'onde correspondante au moyen de la courbe de calibration. La résolution du spectromètre à réseau suffit pour déterminer l'écartement $\lambda(D_1) - \lambda(D_2) = 0,60 \text{ nm}$ des deux raies D jaunes du sodium avec une précision de 0,10 nm. Le pouvoir de résolution élevé va néanmoins de paire avec une perte d'intensité vu qu'une grande partie du rayonnement se perd dans l'ordre 0 non diffracté et que le reste se répartit sur plusieurs ordres de diffraction de part et d'autre de l'ordre 0.



Marche des rayons dans un spectromètre à réseau (P5.7.2.1)

SPECTROMÈTRE À RÉSEAU

P5.7.2.4
Détermination de la constante du réseau holographique à l'aide d'un laser He-Ne

P5.7.2.5
Détermination du spectre d'une lampe xénon à l'aide d'un réseau holographique



Détermination du spectre d'une lampe xénon à l'aide d'un réseau holographique (P5.7.2.5)

N° de cat.	Désignation	P5.7.2.4	P5.7.2.5
471 830	Laser He-Ne à polarisation linéaire	1	
460 01	Lentille dans monture, $f = +5$ mm	1	
460 08	Lentille dans monture, $f = +150$ mm	1	1
460 09	Lentille dans monture, $f = +300$ mm	1	1
471 27	Réseau d'holographie 24000/cm	1	1
441 531	Écran	1	1
460 335	Banc d'optique à profil normalisé, 0,5 m	1	1
460 32	Banc d'optique à profil normalisé, 1 m	1	1
460 341	Charnière rotative avec échelle	1	1
460 374	Cavalier 90/50 pour l'optique	5	6
450 80	Lampe au xénon		1
450 83	Alimentation pour lampe au xénon		1
460 02	Lentille dans monture, $f = +50$ mm		1
460 14	Fente réglable		1
460 21	Support pour éléments enfichables		1
460 22	Monture-support avec pinces à ressort		1
461 62	Diaphragmes à fentes, jeu de 2		1
578 62	Cellule solaire STE 2/19		1
524 013	Sensor-CASSY 2		1
524 220	CASSY Lab 2		1
524 082	Capteur de rotation S		1
460 382	Cavalier à colonne inclinable 90/50		1
501 25	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, rouge		1
501 26	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, bleu		1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		1

Un réseau de réflexion holographique avec 24000 lignes/cm rend possible la construction d'un spectromètre à réseau à grande ouverture et ayant une résolution très élevée. La perte d'intensité est faible par rapport à un réseau de transmission.

Dans l'expérience P5.7.2.4, la constante du réseau de réflexion holographique est déterminée avec différents angles d'incidences. Comme source de lumière, on utilise le laser He-Ne ayant une longueur d'onde $\lambda = 632,8$ nm. Le montage de Littrow permet d'obtenir une valeur très précise quand l'angle d'incidence et de diffraction sont égaux.

Dans l'expérience P5.7.2.5, le spectre de la lampe au xénon est étudié. La figure de diffraction après le réseau holographique est observée sur un écran ou enregistré à l'aide d'une photopile. L'angle de diffraction correspondant est directement lu sur une échelle d'angle de la liaison pivot ou mesuré à l'aide d'un capteur de mouvement de rotation. On constate que le spectre blanc de la lampe est constitué de différentes raies spectrales.

APPLICATIONS OPTIQUES

P5.8.3.1
Interféromètre optique



Interféromètre optique (P5.8.3.1)

N° de cat.	Désignation	P5.8.3.1
474 5220	Lentille biconcave $f = -10$ mm, monture C25	1
474 5264	Élargisseur de faisceau x2,7	1
474 169	Cuve à gaz	1
474 171	Recombineur de faisceau Mach-Zehnder	1
474 174	Séparateur de faisceau Mach-Zehnder	1
474 5418	Module laser à diode 532 nm	1
474 5441	Rail profilé 300 mm	2
474 5442	Rail profilé 500 mm	1
474 5449	Connecteur angulaire, pièce en croix	1
474 209	Plaque de maintien C25, avec cavalier	3
474 2112	Support ajustable, 4 axes, avec butée	1
474 213	Support ajustable, gauche	1
474 251	Valise de transport et de rangement #01	2
474 7210	LIT: Interféromètres optiques	1

Alors que l'interféromètre de Michelson est essentiellement utilisé pour déterminer le déplacement d'un élément réfléchissant à l'échelle nanométrique, l'interféromètre de Mach-Zehnder analyse des objets transparents et est particulièrement utile pour étudier la dynamique des fluides et des gaz. Comme l'interféromètre de Mach-Zehnder est unidirectionnel, il permet notamment des mesures pour lesquelles les échantillons ne doivent être traversés qu'une seule fois ou dans une seule direction.

Dans l'expérience P5.8.3.1, on réalise ces deux types d'interféromètres - de Michelson et de Mach-Zehnder. L'interféromètre de Michelson présente la génération de figures d'interférences et l'utilisation en métrologie de la méthode dite « de comptage de franges » tandis que celui de Mach-Zehnder utilise les figures d'interférences pour visualiser les variations de l'indice de réfraction dues aux variations des propriétés physiques des gaz telles que la pression ou la composition.

NOTIONS DE BASE
DE LASER

P5.8.5.3
Emission et absorption /
Pompage optique



Emission et absorption / Pompage optique (P5.8.5.3)

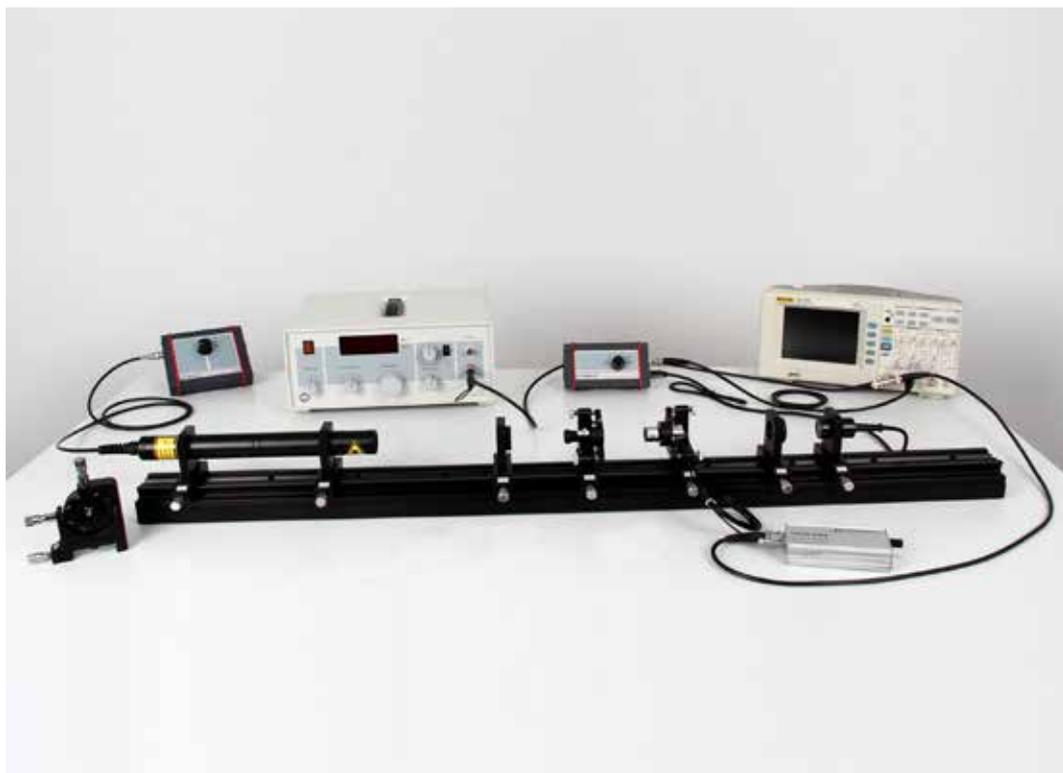
N° de cat.	Désignation	P5.8.5.3
474 1032	Objectif de collimation, asphérique	1
474 104	Objectif de focalisation, $f = 60$ mm	1
474 5310	Barreau de Nd:AG 1064 nm avec monture	1
474 113	Support ajustable pour miroir laser, gauche	1
474 137	Diaphragme à iris, réglable	1
474 5453	Réticule de visée, C25	1
468 74	Filtre pour infrarouges	1
474 107	Support de plaques filtrantes	1
474 4025	Carte de conversion infrarouge 800 - 1400 nm	1
474 306	Boîtier de raccordement pour photodétecteur	1
474 108	Photodétecteur Si, PS/2	1
531 183	Multimètre numérique 3340	1
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	1
474 302	Appareil de commande pour laser à diode	1
474 1021	Laser diode monomode dans support ajustable	1
474 5442	Rail profilé 500 mm	1
474 122	Kit de nettoyage, optique	1
671 9700	Ethanol, absolu, 250 ml	1
474 251	Valise de transport et de rangement #01	1
474 7102	LIT: Émission et absorption	1
474 5464	Oscilloscope à mémoire numérique, 100 MHz, à deux canaux	1*
501 06	Câble HF, BNC-BNC, 1,5 m	1*
501 061	Câble HF, BNC-Mini BNC, 1,5 m	1*
474 611	Lunettes de protection laser 808 et 1064 nm	2*

* complément recommandé

L'expérience P5.8.5.3 initie au pompage optique ainsi qu'à l'émission et à l'absorption. Une émission spontanée et stimulée est produite par pompage. L'émission est temporaire et fait l'objet de mesures et d'analyses par spectroscopie. L'accord de la longueur d'onde d'émission du laser pompé par diode lié à la température permet l'enregistrement du spectre d'absorption. On mesure la durée de vie de l'état excité à partir du temps de déclin de la lumière fluorescente et on calcule le coefficient d'Einstein pour l'émission stimulée.

NOTIONS DE BASE
DE LASER

P5.8.5.4
Résonateur Fabry Perot - Fabry Perot
en analyseur de mode



Résonateur Fabry Perot - Fabry Perot en analyseur de mode (P5.8.5.4)

N° de cat.	Désignation	P5.8.5.4
474 104	Objectif de focalisation, $f = 60$ mm	1
474 1404	Lentille $f = 150$ mm, support C25, plaque de maintien	1
474 140	Lentille d'élargissement d'un faisceau dans support ajustable	1
474 5213	Doublet achromatique $f = 20$ mm, monture C25	1
474 5234	Miroir laser, plan, monture M16	1
474 5235	Miroir laser, $R = 75$, monture M16	1
474 5236	Miroir laser, $R = 100$ mm, monture M16	1
474 5237	Miroir laser, plan, monture M12	1
474 5238	Miroir laser, $R = 75$ mm, monture M12	1
474 5239	Miroir laser, $R = 100$ mm, monture M12	1
474 113	Support ajustable pour miroir laser, gauche	1
474 317	Appareil de commande, piézo	1
474 139	Élément piézoélectrique dans support ajustable	1
522 561	Générateur de fonctions P	1
501 02	Câble HF, 1 m	2
501 091	Raccord en T BNC	1
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	1
474 306	Boîtier de raccordement pour photodétecteur	1
474 108	Photodétecteur Si, PS/2	1
474 5464	Oscilloscope à mémoire numérique, 100 MHz, à deux canaux	1
474 303	Alimentation haute tension pour laser HeNe, réglable	1
474 5421	Laser pilote HeNe $\varnothing 30$ mm	1
474 5445	Rail profilé 1000 mm, base renforcée	1
474 210	Plaque de maintien C30, avec cavalier	2
474 122	Kit de nettoyage, optique	1
671 9700	Ethanol, absolu, 250 ml	1
474 251	Valise de transport et de rangement #01	2
474 7103	LIT: Interféromètre de Fabry Pérot	1
471 828	Lunettes de réglage pour laser He-Ne	2*

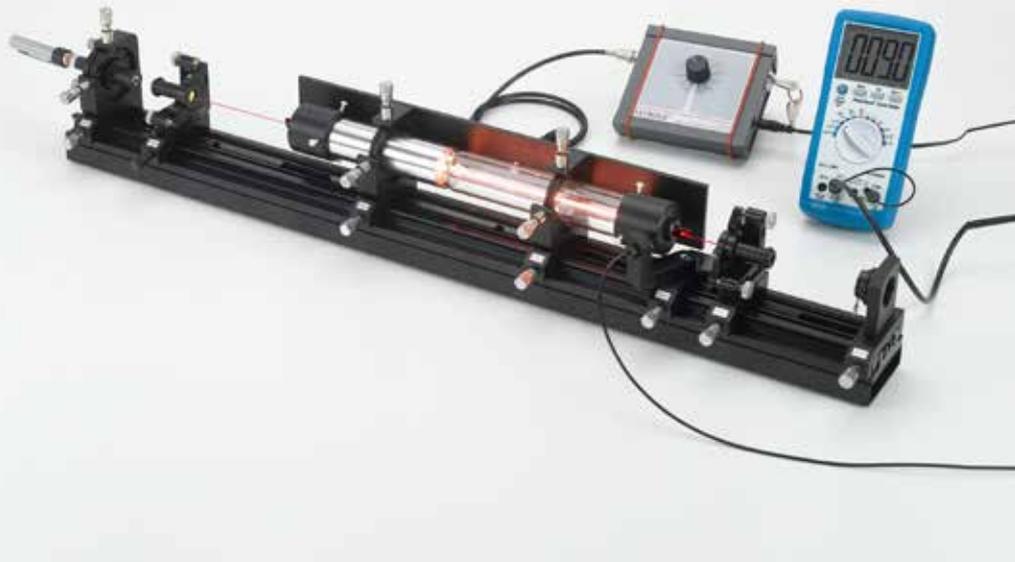
* complément recommandé

Un interféromètre de Fabry Perot est constitué de deux miroirs parallèles qui se font face. La qualité cristalline de la cavité résonante ainsi formée varie si la distance qui sépare les miroirs est modifiée d'un multiple de la demi-longueur d'onde. Le balayage sur la longueur de la cavité crée un spectromètre à haute résolution.

L'expérience P5.8.5.4 présente une cavité Fabry Perot en configuration ouverte. Un élément piézo-électrique sert de scanner et un laser hélium-néon à deux modes de sonde. Le spectre du laser hélium-néon est visualisé sur un oscilloscope. On mesure et on examine aussi les paramètres caractéristiques comme la finesse, l'intervalle spectral libre, la résolution et le contraste. Des composants additionnels pour l'élargissement du faisceau sont utilisés pour étudier l'effet de la finesse technique. On recourt par ailleurs à des miroirs additionnel pour montrer la différence entre un dispositif de Fabry Perot de type plan et celui de type confocal.

NOTIONS DE BASE
DE LASER

P5.8.5.5
Laser hélium-néon



Laser hélium-néon (P5.8.5.5)

N° de cat.	Désignation	P5.8.5.5
474 5242	Miroir laser OC 632, plan, monture M16	1
474 5243	Miroir laser VIS 700, monture M16	1
474 5244	Miroir laser VIS 1000, monture M16	1
474 5246	Miroir laser, plan, monture M16	1
474 113	Support ajustable pour miroir laser, gauche	1
474 114	Support ajustable pour miroir laser, droite	1
474 141	Étalon monomode, support d'ajustage	1
474 137	Diaphragme à iris, réglable	1
474 1082	Photodétecteur Si sur bras pivotant	1
531 183	Multimètre numérique 3340	1
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	1
501 10	Raccord droit BNC	1
474 303	Alimentation haute tension pour laser HeNe, réglable	1
474 127	Tube laser à réglage fin XY	1
474 5422	Laser pilote 532 nm (vert)	1
474 5445	Rail profilé 1000 mm, base renforcée	1
474 122	Kit de nettoyage, optique	1
671 9700	Ethanol, absolu, 250 ml	1
474 251	Valise de transport et de rangement #01	2
474 7104	LIT: Laser HeNe	1
474 126	Prisme de Littrow dans support ajustable	1*
474 142	Filtre biréfringent	1*
474 5245	Miroir laser IR 713, monture M16	2*
474 4025	Carte de conversion infrarouge 800 - 1400 nm	1*
471 828	Lunettes de réglage pour laser He-Ne	2*

* complément recommandé

L'expérience P5.8.5.5 consiste à réaliser un laser hélium-néon constitué des éléments de base. La cavité en configuration ouverte permet de modifier les paramètres pour mesurer le profil du faisceau pour différentes configurations et distances des miroirs de la cavité. Le tube laser est muni de chaque côté d'une fenêtre à incidence de Brewster qui permet d'étudier la polarisation et les pertes. L'insertion optionnelle d'un prisme de Littrow permet la sélection de longueurs d'onde autres que la raie laser principale à 632 nm, notamment la raie orange à 611 nm. La possibilité d'ajuster les raies est mise en évidence moyennant le cristal biréfringent optionnel. On utilise un étalon pour obtenir le fonctionnement monomode du laser hélium-néon.

LASERS À SEMI-CONDUCTEURS

P5.8.6.1 Diode laser



Diode laser (P5.8.6.1)

N° de cat.	Désignation	P5.8.6.1
474 5266	Lentille cylindrique convergente $f = 20 \text{ mm}$	1
474 5267	Lentille cylindrique convergente $f = 80 \text{ mm}$	1
474 1032	Objectif de collimation, asphérique	1
474 5310	Barreau de Nd:AG 1064 nm avec montage	1
474 113	Support ajustable pour miroir laser, gauche	1
474 112	Polariseur / Analyseur tournant	1
474 5453	Réticule de visée, C25	1
474 4025	Carte de conversion infrarouge 800 - 1400 nm	1
474 306	Boîtier de raccordement pour photodétecteur	1
474 108	Photodétecteur Si, PS/2	1
531 183	Multimètre numérique 3340	1
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	1
474 302	Appareil de commande pour laser à diode	1
474 1012	Laser à diode, support rotatif deux axes	1
474 5442	Rail profilé 500 mm	1
474 209	Plaque de maintien C25, avec cavalier	2
474 122	Kit de nettoyage, optique	1
671 9700	Ethanol, absolu, 250 ml	1
474 251	Valise de transport et de rangement #01	1
474 7105	LIT: Laser à diode	1
474 5464	Oscilloscope à mémoire numérique, 100 MHz, à deux canaux	1*
501 06	Câble HF, BNC-BNC, 1,5 m	1*
501 061	Câble HF, BNC-Mini BNC, 1,5 m	1*
474 611	Lunettes de protection laser 808 et 1064 nm	2*

* complément recommandé

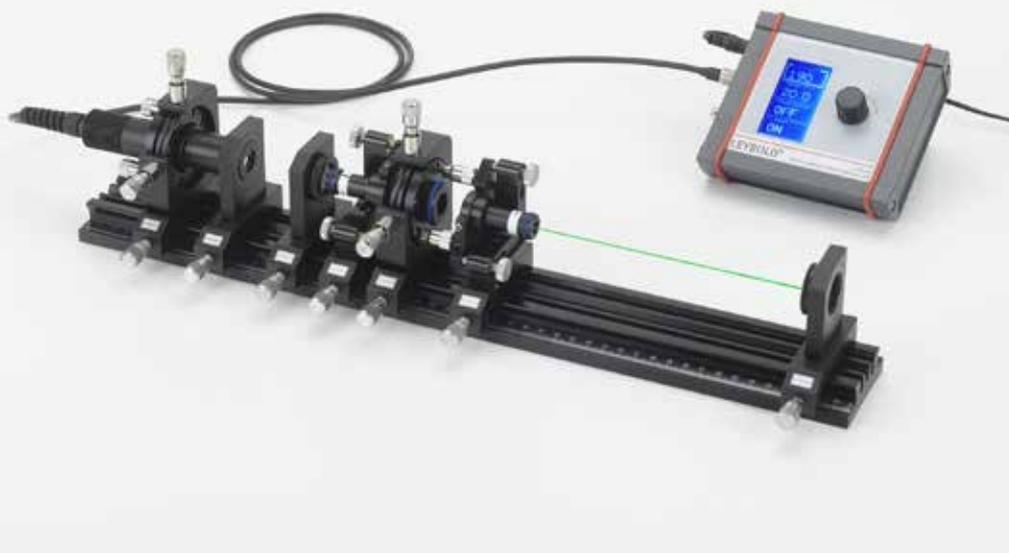
Le but de l'expérience P5.8.6.1 est d'étudier les propriétés d'une diode laser, à savoir ses paramètres caractéristiques comme la puissance et la longueur d'onde d'émission en fonction de la température. Dans une prochaine étape, on mesure répartition spatiale de l'intensité. À l'aide de deux lentilles cylindriques, on convertit le faisceau de forme plus ou moins elliptique en un faisceau presque circulaire.

LASERS À SEMI-CONDUCTEURS

P5.8.6.2
Pompé par diode laser Nd: YAG laser

P5.8.6.3
Doublage de fréquence, 1064 nm ->
532 nm

P5.8.6.4
Doublage de fréquence, 1320 nm ->
660 nm



Doublage de fréquence, 1064 nm -> 532 nm (P5.8.6.3)

N° de cat.	Désignation	P5.8.6.2	P5.8.6.3	P5.8.6.4
474 1032	Objectif de collimation, asphérique	1	1	1
474 104	Objectif de focalisation, f = 60 mm	1	1	1
474 5310	Barreau de Nd:AG 1064 nm avec monture	1	1	
474 5311	Miroir laser SHG 100, dans monture	1	1	
474 113	Support ajustable pour miroir laser, gauche	1	1	1
474 114	Support ajustable pour miroir laser, droite	1	1	1
474 5453	Réticule de visée, C25	1	1	1
474 107	Support de plaques filtrantes	1	1	1
468 74	Filtre pour infrarouges	1	1	1
474 4025	Carte de conversion infrarouge 800 - 1400 nm	1	1	1
474 306	Boîtier de raccordement pour photodétecteur	1	1	1
474 108	Photodétecteur Si, PS/2	1	1	
474 5464	Oscilloscope à mémoire numérique, 100 MHz, à deux canaux	1	1	1
501 06	Câble HF, BNC-BNC, 1,5 m	1	1	1
501 061	Câble HF, BNC-Mini BNC, 1,5 m	1	1	1
474 302	Appareil de commande pour laser à diode	1	1	1
474 102	Laser à diode dans support ajustable	1	1	1
474 5442	Rail profilé 500 mm	1	1	1
474 122	Kit de nettoyage, optique	1	1	1
671 9700	Ethanol, absolu, 250 ml	1	1	1
474 251	Valise de transport et de rangement #01	1	1	1
474 7106	LIT: Laser à solide pompé par diodes (DPSSL)	1	1	1
474 611	Lunettes de protection laser 808 et 1064 nm	2*	2*	2*
474 109	Cristal KTP avec support ajustable, vert		1	
468 77	Filtre passe-bande vert		1	
474 137	Diaphragme à iris, réglable		1*	1*
474 1094	Cristal de KTP avec support ajustable, rouge			1
474 5240	Barreau de Nd:YAG 1320 nm, avec monture			1
474 5241	Miroir SHG100, 1320 nm			1
474 5290	Filtre anti-infrarouge KG5			1
474 1081	Photodétecteur InGaAs			1

* complément recommandé

Dans l'expérience P5.8.6.2, il s'agit de réaliser un laser Nd:YAG pompé par une diode laser. Dans un premier temps, on caractérise la diode laser de pompage. Ensuite, on procède à l'analyse spectrale et temporaire du processus de pompage optique et de la fluorescence (émission spontanée) par modulation et variation de la longueur d'onde du laser pompe menant aux coefficients d'Einstein. La troisième étape consiste à mettre le laser en service en rajoutant le deuxième miroir de la cavité. On détermine le seuil et l'efficacité du laser et on met en évidence le phénomène d'oscillations de relaxation appelé « spiking » en modulant la diode laser de pompage. Le critère de stabilité peut être vérifié en modifiant la longueur de la cavité laser.

L'expérience P5.8.6.3 consiste à optimiser la configuration de base du laser Nd:YAG pompé par diode (P5.8.6.2) avec un module cristal KTP placé dans la cavité laser pour ainsi générer une lumière verte et visible (532 nm), doublée en fréquence. En ajoutant le diaphragme ajustable optionnel, la structure du mode transverse peut être contrôlée pour différentes structures TEM jusqu'à TEM00.

L'expérience P5.8.6.4 est une variante de l'expérience P5.8.6.3 mais en utilisant différents miroirs traités et différentes orientations de coupe du cristal de KTP, le laser Nd:YA fonctionne à 1320 nm et la lumière visible doublée en fréquence est rouge à une longueur d'onde de 660 nm.

FIBRE OPTIQUE

P5.8.7.1
Laser à fibre



Laser à fibre (P5.8.7.1)

N° de cat.	Désignation	P5.8.7.1
474 104	Objectif de focalisation, $f = 60$ mm	1
474 5308	Filtre passe-bande $1,5 \mu\text{m}$	1
474 190	Coupleur à fusion WDM 980/1550 nm	1
474 191	Collimateur pour fibre avec connecteur ST, gauche	1
474 192	Collimateur pour fibre avec connecteur ST, droite	1
474 194	Support pour fibre ST, C25	1
474 1898	Fibre dopée erbium 8 m	1
474 246	Module de découplage	1
474 5293	Fibre monomode sur bobine 100 m, connecteurs ST	1
474 5296	Câble patch à fibre optique ST/ST, longueur 0,25 m	3
474 5297	Câble patch à fibre optique ST/ST, longueur 1 m	1
474 4025	Carte de conversion infrarouge 800 - 1400 nm	1
474 306	Boîtier de raccordement pour photodétecteur	1
474 108	Photodétecteur Si, PS/2	1
474 1084	Photodétecteur InGaAs	1
474 5464	Oscilloscope à mémoire numérique, 100 MHz, à deux canaux	1
501 06	Câble HF, BNC-BNC, 1,5 m	1
501 061	Câble HF, BNC-Mini BNC, 1,5 m	1
474 302	Appareil de commande pour laser à diode	1
474 5426	Module laser à diode 980 nm, connecteur ST	1
474 5442	Rail profilé 500 mm	1
474 5444	Rail profilé 1000 mm	1
474 209	Plaque de maintien C25, avec cavalier	1
474 251	Valise de transport et de rangement #01	2
474 7110	LIT: Laser à fibre	1
474 189	Fibre dopée erbium 2 m	1*
474 1894	Fibre dopée erbium 4 m	1*
474 1896	Fibre dopée erbium 16 m	1*
474 5278	Module de blocage de mode passif $1,5 \mu\text{m}$	1*
474 5279	Isolateur optique $1,5 \mu\text{m}$	1*
474 611	Lunettes de protection laser 808 et 1064 nm	2*

* complément recommandé

Dans l'expérience P5.8.7.1, une fibre dopée à l'erbium est utilisée comme milieu actif. Celle-ci étant connectée à un laser de pompe, on analyse la fluorescence de la fibre dopée à l'erbium. Avant d'étudier le fonctionnement du laser à $1,5 \mu\text{m}$, on mesure la durée de vie de l'état excité. Afin de former un laser en anneau, on utilise la technologie du multiplexage en longueur d'onde (WDM) pour faire passer la lumière de pompe dans la fibre et fermer la structure en anneau du laser. L'anneau est ouvert à l'endroit où une fine lame de verre couple une petite fraction des modes laser en sens horaire et anti-horaire vers un détecteur.

FIBRE OPTIQUE

P5.8.7.3
Fibre optique



Fibre optique (P5.8.7.3)

N° de cat.	Désignation	P5.8.7.3
474 1036	Collimateur sur cavalier, microscope	1
474 151	Coupleur d'entrée, support ajustable XY	1
474 152	Porte-fibre avec plateau à déplacement	1
474 154	Porte-fibre sur plateau tournant	1
474 5227	Fibre optique multimode 1000 m	1
474 6420	Coupeur de fibre	1
474 6421	Dénudeuse, réglable	1
474 4025	Carte de conversion infrarouge 800 - 1400 nm	1
474 306	Boîtier de raccordement pour photodétecteur	1
474 216	Photodétecteur Si PIN pour bras pivotant, C25	1
474 5464	Oscilloscope à mémoire numérique, 100 MHz, à deux canaux	1
501 06	Câble HF, BNC-BNC, 1,5 m	1
501 061	Câble HF, BNC-Mini BNC, 1,5 m	1
474 302	Appareil de commande pour laser à diode	1
474 1022	Laser à diode dans support ajustable	1
474 5442	Rail profilé 500 mm	1
474 251	Valise de transport et de rangement #01	1
474 7119	LIT: Fibres optiques en verre	1
474 5226	Fibre optique monomode 1000 m	1*
474 5295	Fibre optique multimode 5000 m	1*
474 611	Lunettes de protection laser 808 et 1064 nm	2*

* complément recommandé

L'expérience P5.8.7.3 est consacrée à l'étude des fibres optiques en verre. Dans cette expérience, on caractérise la puissance de sortie du laser à diode en fonction de la température et du courant d'injection. On mesure aussi la répartition spatiale de l'intensité.

Il s'agit ensuite de mesurer la distribution de l'intensité de la lumière qui émerge à l'extrémité de la fibre et de déterminer l'ouverture numérique.

Par modulation du laser à diode à l'aide du dispositif commandé par microprocesseur qui est fourni, il est possible de mesurer le temps de propagation à l'intérieur de la fibre. Les résultats obtenus permettent ensuite de calculer la longueur de la fibre ou la vitesse de la lumière.

APPLICATIONS TECHNIQUES

P5.8.8.4
Anémométrie Laser Doppler

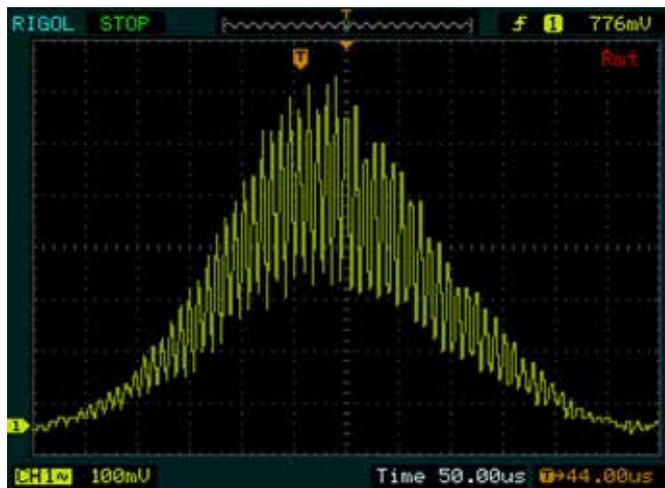


Anémométrie Laser Doppler (P5.8.8.4)

N° de cat.	Désignation	P5.8.8.4
474 104	Objectif de focalisation, f = 60 mm	2
474 107	Support de plaques filtrantes	1
474 187	Séparateur de faisceau VLD	1
474 1876	Déviator du faisceau et focalisation VLD	1
474 188	Buse de diffusion de brume sur cavalier	1
474 315	Nébuliseur, ultrasons	1
474 194	Support pour fibre ST, C25	1
474 5350	Câble patch, connecteurs ST-ST, 600 µm	1
474 3314	Photodétecteur 400...1100 nm	1
474 5464	Oscilloscope à mémoire numérique, 100 MHz, à deux canaux	1
501 06	Câble HF, BNC-BNC, 1,5 m	1
501 061	Câble HF, BNC-Mini BNC, 1,5 m	1
474 128	Module laser à diode	1
474 5442	Rail profilé 500 mm	1
474 209	Plaque de maintien C25, avec cavalier	1
474 251	Valise de transport et de rangement #01	2
474 7115	LIT: Anémomètre laser à effet Doppler	1
471 828	Lunettes de réglage pour laser He-Ne	2*

* complément recommandé

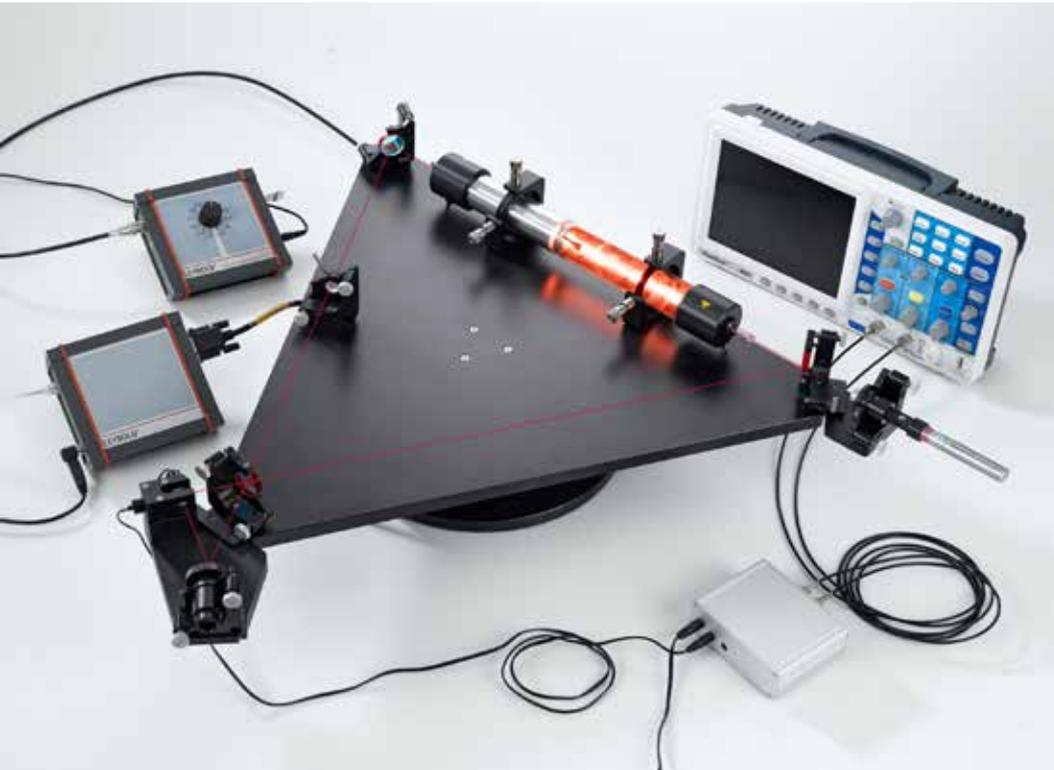
La vélocimétrie laser Doppler est une technique qui permet de mesurer la vitesse sans contact en un point d'un écoulement (fluide, gaz). L'expérience P5.8.8.4 consiste à réaliser un vélocimètre ou anémomètre laser Doppler. Des gouttelettes d'eau dans le volume de mesure sont éclairées par la lumière d'un laser. La lumière diffusée est décalée en fréquence par l'effet Doppler. Le décalage en fréquence est déterminé puis converti en vitesse des particules ou vitesse d'écoulement. Les gouttelettes d'eau sont trop fines pour adhérer aux surfaces avoisinantes, elles vont juste s'évaporer ou rebondir à cause de la tension superficielle.



Signal d'oscilloscope d'une goutte d'eau traversant la zone d'interférence (P5.8.8.4).

APPLICATIONS TECHNIQUES

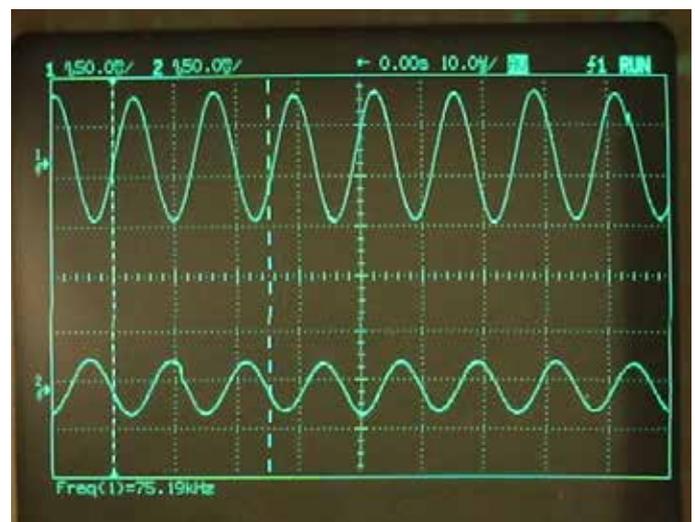
P5.8.8.5
Gyroscope à laser HeNe



Gyroscope à laser HeNe (P5.8.8.5)

N° de cat.	Désignation	P5.8.8.5
474 159	Plaque de base gyroscope	1
474 160	Unité de rotation	1
474 330	Commande de moteur pas à pas 1 axe	1
474 407	Unité de détection de franges pour gyroscope	1
474 308	Préamplificateur de photodétecteur	1
474 311	Fréquence-mètre	1
474 346	Adaptateur secteur 12 V - 2,5 A	1
474 5464	Oscilloscope à mémoire numérique, 100 MHz, à deux canaux	1
501 061	Câble HF, BNC-Mini BNC, 1,5 m	4
728 950	Isolateur d'interface USB/USB	1
474 303	Alimentation haute tension pour laser HeNe, réglable	1
474 5423	Laser d'alignement 532 nm	1
474 122	Kit de nettoyage, optique	1
671 9700	Ethanol, absolu, 250 ml	1
474 7116	LIT: Toupie laser	1
	En complément : PC avec Windows à partir de 7	1

Il s'agit dans l'expérience P5.8.8.5 de réaliser un gyroscope à laser. On met en place un laser en anneau à trois miroirs ; lorsque ce laser est en rotation, les chemins optiques horaire et anti-horaire ne sont plus les mêmes et le mélange des deux faisceaux lumineux va générer une fréquence de battement dans la gamme des kHz. La rotation absolue du laser peut ainsi être mesurée. Il ne s'agit pas d'un interféromètre de Sagnac, le milieu laser étant dans le système en rotation, le dispositif créé avec une fréquence de battement est bien plus sensible qu'un dispositif à déphasage.



Signal de sortie des photodiodes pendant la rotation (P5.8.8.5).

P6.2.7.4

Mesure du clivage selon Zeeman de la raie rouge du cadmium en fonction du champ magnétique - Spectroscopie avec un étalon de Fabry-Pérot

Pour plus d'informations sur cette expérience, rendez-vous à la page 206.



P6 PHYSIQUE ATOMIQUE ET NUCLÉAIRE



P6.1	EXPÉRIENCES D'INITIATION	193
P6.2	CORTÈGE ÉLECTRONIQUE	198
P6.3	RAYONS X	207
P6.4	RADIOACTIVITÉ	218
P6.5	PHYSIQUE NUCLÉAIRE	222
P6.6	PHYSIQUE QUANTIQUE	229

P6 PHYSIQUE ATOMIQUE ET NUCLÉAIRE



P6.1 EXPÉRIENCES D'INITIATION

P6.1.2	Expérience de Millikan	193
P6.1.3	Charge spécifique	194
P6.1.4	Constante de Planck	195-196
P6.1.5	Dualité onde-corpuscule	197

P6.2 CORTÈGE ÉLECTRONIQUE

P6.2.1	Série de Balmer de l'hydrogène	198-199
P6.2.2	Spectres d'émission et d'absorption	200-202
P6.2.4	Expérience de Franck et Hertz	203-204
P6.2.6	Résonance de spin électronique (RSE)	205
P6.2.7	Effet Zeeman normal	206

P6.3 RAYONS X

P6.3.1	Mise en évidence de rayons X	207-209
P6.3.2	Atténuation de rayons X	210
P6.3.3	Physique cortège électronique	211
P6.3.5	Spectroscopie d'énergie de rayons X	212
P6.3.6	Structure des spectres du rayon X	213-214
P6.3.7	Effet Compton sur rayons X	215
P6.3.8	Tomographie à rayons X	216-217

P6.4 RADIOACTIVITÉ

P6.4.1	Mise en évidence d'un rayonnement radioactif	218
P6.4.2	Distribution de Poisson	219
P6.4.3	Désintégration radioactive et demi-vie	220
P6.4.4	Atténuation des rayonnements α -, β - et γ	221

P6.5 PHYSIQUE NUCLÉAIRE

P6.5.1	Visualisation des trajectoires de particules	222
P6.5.2	Diffusion de Rutherford	223
P6.5.3	Résonance magnétique nucléaire (RMN)	224
P6.5.4	Spectroscopie α	225
P6.5.5	Spectroscopie γ	226
P6.5.6	Effet Compton	227
P6.5.7	Caractéristiques des particules	228

P6.6 PHYSIQUE QUANTIQUE

P6.6.1	Optique quantique	229
P6.6.2	Particules	230

EXPÉRIENCE DE MILLIKAN

P6.1.2.1

Détermination de la charge élémentaire électrique selon Millikan et mise en évidence de la quantification de la charge - Mesure de la tension flottante et de la vitesse de chute

P6.1.2.2

Détermination de la charge élémentaire électrique selon Millikan et mise en évidence de la quantification de la charge - Mesure de la vitesse d'ascension et de la vitesse de chute

P6.1.2.3

Détermination de la charge élémentaire électrique selon Millikan et mise en évidence de la quantification de la charge - Mesure de la tension flottante et de la vitesse de chute avec CASSY

P6.1.2.4

Détermination de la charge élémentaire électrique selon Millikan et mise en évidence de la quantification de la charge - Mesure de la vitesse d'ascension et de la vitesse de chute avec CASSY



Détermination de la charge élémentaire électrique selon Millikan et mise en évidence de la quantification de la charge - Mesure de la tension flottante et de la vitesse de chute (P6.1.2.1)

N° de cat.	Désignation	P6.1.2.1	P6.1.2.2	P6.1.2.3	P6.1.2.4
559 412	Appareil de Millikan	1	1	1	1
559 421	Alimentation pour l'appareil de Millikan	1	1	1	1
575 471	Compteur S	1	2		
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	2	3	3	3
501 461	Câbles d'expérimentation 19 A, 100 cm, noirs, paire	1	1	1	1
524 013	Sensor-CASSY 2			1	1
524 220	CASSY Lab 2			1	1
524 034	Adaptateur timer			1	1
500 421	Câble de connexion 19 A, 50 cm, rouge				1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)			1	1

En 1910, *R. A. Millikan* a réussi à mettre en évidence l'apparition quantique de petites quantités d'électricité grâce à sa méthode bien connue des gouttelettes d'huile. Il fit flotter des gouttes d'huile électrisées dans le champ électrique vertical d'un condensateur à plaques et détermina la charge q d'une gouttelette flottante d'après le rayon r et le champ électrique E .

$$q = \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \frac{\rho \cdot g}{E}$$

ρ : densité de l'huile

g : accélération de la pesanteur

Il a constaté que q ne se présente que comme multiple entier d'une charge élémentaire e . Ses expériences sont effectuées en deux variantes.

Au cours de la première variante, expériences P6.1.2.1 et P6.1.2.3, on calcule le champ électrique

$$E = \frac{U}{d}$$

d : Écartement des plaques

d'après la tension U au condensateur à plaques, tension pour laquelle la goutte d'huile observée flotte. Pour déterminer le rayon, on calcule ensuite la vitesse de chute v_1 constante de la gouttelette lorsque le champ électrique est interrompu. D'après l'équilibre entre poids et frottement de Stokes on a

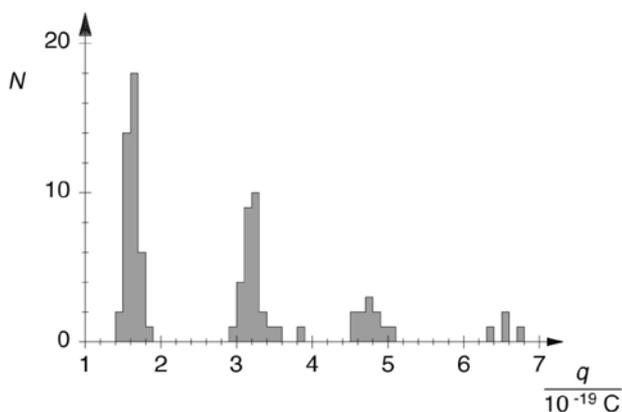
$$\frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g = 6\pi \cdot r \cdot \eta \cdot v_1$$

η : viscosité

Pour la seconde variante, expériences P6.1.2.2 et P6.1.2.4, on observe les gouttelettes d'huile qui ne flottent pas tout à fait dans le champ électrique mais qui ont une petite vitesse d'ascension v_2 . On a pour ces gouttelettes

$$q \cdot \frac{U}{d} = \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g + 6\pi \cdot r \cdot \eta \cdot v_2$$

On mesure en plus la vitesse de chute v_1 , tout comme dans les expériences P6.1.2.1 et P6.1.2.3. La précision de la mesure de la charge q peut être affinée en laissant monter puis descendre plusieurs fois de suite la gouttelette d'huile sur une hauteur donnée et en mesurant le temps total d'ascension ou de chute.



Histogramme pour la mise en évidence de la quantification de la charge (P6.1.2.1-4)

CHARGE SPÉCIFIQUE

P6.1.3.1

Détermination de la charge spécifique de l'électron



Détermination de la charge spécifique de l'électron (P6.1.3.1)

N° de cat.	Désignation	P6.1.3.1
555 571	Tube à faisceau électronique filiforme	1
555 581	Support avec bobines de Helmholtz et dispositif de mesure	1
531 120	Multimètre LDanalog 20	2
521 651	Alimentation pour tubes, 0...500 V	1
521 546	Alimentation CC 0...16 V/0...5 A	1
311 78	Mètre ruban 2 m	1
500 614	Câble de connexion de sécurité 25 cm, noir	3
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir	3
500 644	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, noir	7
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1*
524 0382	Sonde B axiale S, ±1000 mT	1*
501 11	Câble rallonge, à 15 pôles	1*

* complément recommandé

La masse m_e de l'électron est expérimentalement difficilement accessible. Il est en revanche plus simple de déterminer la charge spécifique de l'électron

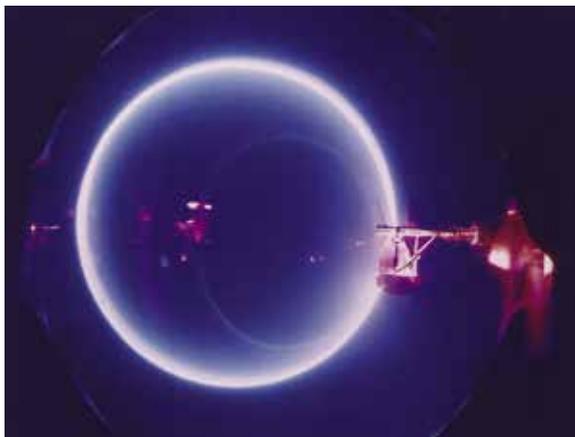
$$\varepsilon = \frac{e}{m_e}$$

d'après laquelle on peut calculer la masse m_e en connaissant la charge élémentaire e .

Au cours de l'expérience P6.1.3.1, pour déterminer la charge spécifique de l'électron, un fin jet électronique concentré est dévié dans un champ magnétique homogène, suivant ainsi une trajectoire circulaire fermée. On détermine en fonction de la tension accélératrice U le champ magnétique B qui force les électrons à suivre cette trajectoire de rayon r donné. La force de Lorentz engendrée par le champ magnétique agit comme une force centripète. Elle dépend de la vitesse des électrons qui est, quant à elle, déterminée par la tension accélératrice. On calcule ainsi la charge spécifique de l'électron selon:

$$\frac{e}{m_e} = 2 \cdot \frac{U}{B^2 \cdot r^2}$$

d'après les grandeurs mesurées U , B et r .



Trajet circulaire des électrons dans le tube à faisceau fin (P6.1.3.1).



CONSTANTE DE PLANCK

P6.1.4.2

Détermination de la constante de Planck - Décomposition de la longueur d'onde avec un prisme à vision directe sur le banc d'optique

P6.1.4.3

Détermination de la constante de Planck - Sélection de la longueur d'onde avec des filtres d'interférences sur le banc d'optique

Détermination de la constante de Planck - Décomposition de la longueur d'onde avec un prisme à vision directe sur le banc d'optique (P6.1.4.2)

N° de cat.	Désignation	P6.1.4.2	P6.1.4.3
558 77	Cellule photo-électrique pour la détermination de h	1	1
558 791	Monture pour cellule photo-électrique	1	1
460 317	Banc d'optique, profil S1, 0,5 m	2	1
460 3151	Socle articulé avec échelle de lecture et noix	1	
460 311	Cavalier avec noix 45/65	2	1
460 3112	Cavalier avec noix 75/65	5	4
460 02	Lentille dans monture, f = +50 mm	1	
460 08	Lentille dans monture, f = +150 mm	2	
461 62	Diaphragmes à fentes, jeu de 2	1	
460 22	Monture-support avec pinces à ressort	1	
460 14	Fente réglable	1	
466 05	Prisme à vision directe	1	
466 04	Support pour prisme à vision directe	1	
451 15	Lampe haute pression au mercure, dans boîtier	1	1
451 195	Alimentation pour lampe haute pression au mercure	1	1
532 14	Amplificateur électromètre	1	1
562 791	Adaptateur secteur 12 V CA	1	1
578 22	Condensateur 100 pF, STE 2/19	1	1
579 10	Bouton-poussoir (contacteur), STE 2/19	1	1
590 011	Fiche de fixation	2	2
531 120	Multimètre LDanalog 20	1	1
501 10	Raccord droit BNC	1	1
501 09	Adaptateur BNC/4 mm, unipolaire	1	1
340 89	Coupleur enfichable 4 mm	1	1
502 04	Multiprise	1	1
501 45	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, rouge/bleu, paire	1	1
500 440	Câble d'expérimentation 19 A, 100 cm, jaune/vert	2	2
468 41	Support pour filtre interférentiel		1
468 401	Filtre d'interférence, 578 nm		1
468 402	Filtre d'interférence, 546 nm		1
468 403	Filtre d'interférence, 436 nm		1

N° de cat.	Désignation	P6.1.4.2	P6.1.4.3
468 406	Filtre d'interférence, 365 nm		1
460 03	Lentille dans monture f = +100 mm		1
460 26	Diaphragme à iris		1
468 404	Filtre d'interférence, 405 nm		1*

* complément recommandé

Si une lumière de fréquence ν rencontre la cathode d'une cellule photoélectrique, alors des électrons sont libérés. Une partie des électrons atteint l'anode et produit dans le circuit électrique extérieur un courant ramené à zéro par application d'une tension inverse $U = -U_0$. La relation

$$e \cdot U_0 = h \cdot \nu - W \quad W : \text{travail d'extraction}$$

valable dans ce cas, a été utilisée pour la première fois par *R. A. Millikan* pour déterminer la constante de Planck h .

Pour déterminer la constante de Planck à l'aide de l'effet photoélectrique, il est important qu'à chaque fois, il n'y ait que la lumière d'une seule raie spectrale de la lampe à vapeur de mercure qui incide sur la cathode. Pour choisir la longueur d'onde, on peut aussi utiliser des filtres d'interférence à bande étroite à la place d'un prisme. Le montage optique est ainsi beaucoup plus simple et la pièce où a lieu l'expérience n'a plus besoin de se trouver dans l'obscurité. En outre, on peut faire varier sans problèmes l'intensité de la lumière qui incide sur la cathode à l'aide d'un diaphragme à iris.

Pour l'expérience P6.1.4.2 et P6.1.4.3, on choisit un montage ouvert sur le banc optique. La décomposition de la longueur d'onde est effectuée avec un prisme à vision directe. A chaque fois, la lumière rencontre précisément une raie spectrale à la cathode de la cellule photoélectrique. Un condensateur est branché entre l'anode et la cathode de la cellule photoélectrique. Il est chargé par le courant anodique et produit ainsi une tension inverse U . Dès que la tension inverse a atteint la valeur $-U_0$, le courant anodique est nul et la charge du condensateur prend fin. La mesure de U_0 se fait sans courant à l'aide d'un amplificateur électromètre. *Remarque* : il est également possible en alternative de prélever la tension inverse U de la source de tension continue. Pour la mesure sensible du courant anodique, il est alors conseillé d'utiliser l'amplificateur de mesure D (voir P6.1.4.4).

CONSTANTE DE PLANCK

P6.1.4.4

Détermination de la constante de Planck – Tracé de caractéristiques courant / tension, sélection de la longueur d'onde avec des filtres d'interférences sur le banc



Détermination de la constante de Planck – Tracé de caractéristiques courant / tension, sélection de la longueur d'onde avec des filtres d'interférences sur le banc (P6.1.4.4)

N° de cat.	Désignation	P6.1.4.4
558 77	Cellule photo-électrique pour la détermination de h	1
558 791	Monture pour cellule photo-électrique	1
460 335	Banc d'optique à profil normalisé, 0,5 m	1
460 374	Cavalier 90/50 pour l'optique	2
460 375	Cavalier 120/50 pour l'optique	3
558 792	Roue pour filtres avec diaphragme à iris	1
468 401	Filtre d'interférence, 578 nm	1
468 402	Filtre d'interférence, 546 nm	1
468 403	Filtre d'interférence, 436 nm	1
468 404	Filtre d'interférence, 405 nm	1
468 406	Filtre d'interférence, 365 nm	1
460 03	Lentille dans monture f = +100 mm	1
460 26	Diaphragme à iris	1
451 15	Lampe haute pression au mercure, dans boîtier	1
451 195	Alimentation pour lampe haute pression au mercure	1
532 00	Amplificateur de mesure D	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 220	CASSY Lab 2	1
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité, 20/10	2
576 86	Porte-pile Mono STE 2/50	3
685 48	Pile 1,5 V (Mono)	3
577 93	Potentiomètre 1 kohm, 10 tours, STE 4/50	1
579 13	Interrupteur à bascule STE 2/19	1
501 48	Cavalier STE 2/19, jeu de 10	1
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	2
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	2
500 644	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, noir	1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

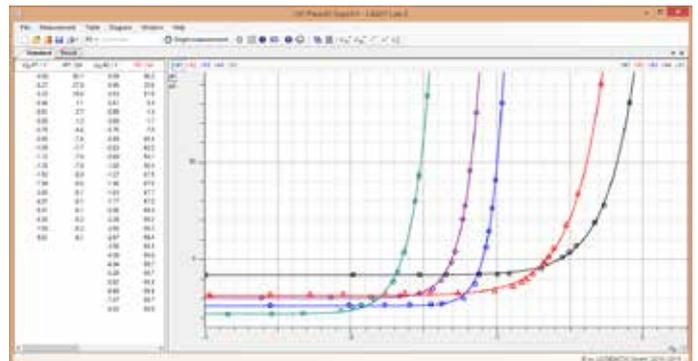
Si une lumière de fréquence ν rencontre la cathode d'une cellule photoélectrique, alors des électrons sont libérés. Une partie des électrons atteint l'anode et produit dans le circuit électrique extérieur un courant ramené à zéro par application d'une tension inverse $U = -U_0$. La relation

$$e \cdot U_0 = h \cdot \nu - W \quad W : \text{travail d'extraction}$$

valable dans ce cas, a été utilisée pour la première fois par R. A. Millikan pour déterminer la constante de Planck h .

Pour déterminer la constante de Planck à l'aide de l'effet photoélectrique, il est important qu'à chaque fois, il n'y ait que la lumière d'une seule raie spectrale de la lampe à vapeur de mercure qui incide sur la cathode. Pour choisir la longueur d'onde, on peut aussi utiliser des filtres d'interférence à bande étroite à la place d'un prisme. Le montage optique est ainsi beaucoup plus simple et la pièce où a lieu l'expérience n'a plus besoin de se trouver dans l'obscurité. En outre, on peut faire varier sans problèmes l'intensité de la lumière qui incide sur la cathode à l'aide d'un diaphragme à iris.

Au cours de l'expérience P6.1.4.4 on sélectionne une des raies de la lumière d'une lampe à mercure à l'aide de filtres interférentiels pour la représenter à la cathode de la cellule photo-électrique. La tension inverse à l'anode est modifiée et l'on mesure le courant induit avec une très grande précision. La variation des caractéristiques à illumination à différentes longueurs d'ondes permet la détermination de la constante de Planck h .



Caractéristiques courant-tension de la photocellule (P6.1.4.4).

**DUALITÉ
ONDE-CORPUSCULE**

P6.1.5.1
Diffraction d'un faisceau d'électrons par une structure polycristalline (diffraction de Debye-Scherrer)

P6.1.5.2
Analogie optique pour la diffraction d'un faisceau d'électrons par une structure polycristalline



Diffraction d'un faisceau d'électrons par une structure polycristalline (diffraction de Debye-Scherrer) (P6.1.5.1)

N° de cat.	Désignation	P6.1.5.1	P6.1.5.2
555 626	Tube pour la diffraction d'un faisceau d'électrons	1	
555 600	Support pour tubes	1	
521 70	Alimentation haute tension 10 kV	1	
311 54	Pied à coulisse de précision	1	
500 611	Câble de connexion de sécurité, 25 cm, rouge	1	
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	1	
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	1	
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1	
500 644	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, noir	2	
555 629	Réseau en croix tournant		1
450 641	Lampe halogène 12 V, 50/100W		1
450 63	Ampoule halogène 12 V/100 W, G6,35		1
450 66	Passe-vues		1
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A		1
460 03	Lentille dans monture f = +100 mm		1
460 22	Monture-support avec pinces à ressort		1
441 53	Écran, translucide		1
311 78	Mètre ruban 2 m		1
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m		1
460 311	Cavalier avec noix 45/65		2
460 312	Cavalier avec noix 45/35		3
500 98	Douilles d'adaptation de sécurité, noires (6)		1
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir		2



Analogie optique pour la diffraction de Debye-Scherrer (P6.1.5.2)

En 1924, *L. de Broglie* émet l'hypothèse selon laquelle les particules présentent outre leurs propriétés corpusculaires bien connues, des propriétés ondulatoires et que leur longueur d'onde donnée par dépend de l'impulsion p .

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad h : \text{constante de Planck}$$

Ses réflexions ont été vérifiées expérimentalement en 1927 par *C. Davisson* et *L. Germer* par diffraction d'un faisceau d'électrons par une structure cristalline.

La diffraction d'électrons par du graphite polycristallin est démontrée au cours de l'expérience P6.1.5.1. Tout comme pour la méthode de Debye et Scherrer avec des rayons X, on observe sur l'écran des anneaux de diffraction autour d'une tache centrale suivant la direction du rayonnement. Ces anneaux sont dus à la diffraction du faisceau d'électrons par les plans réticulaires des microcristaux qui remplissent la condition de Bragg

$$2 \cdot d \cdot \sin \vartheta = n \cdot \lambda$$

ϑ : angle d'ouverture de l'anneau de diffraction

d : Écartement des plans réticulaires

Comme la structure du graphite présente deux écartements des plans réticulaires, on observe deux anneaux de diffraction dans le premier ordre. La longueur d'onde des électrons

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot m_e \cdot e \cdot U}}$$

m_e : masse de l'Électron, e : charge Élémentaire

est déterminée d'après la tension accélératrice U , d'où l'on a

$$\sin \vartheta \propto \frac{1}{\sqrt{U}}$$

pour l'angle d'ouverture des anneaux de diffraction.

Dans l'expérience P6.1.5.2, on illustre la méthode de Debye et Scherrer appliquée à un tube pour la diffraction d'électrons avec de la lumière visible. Pour cela, de la lumière monochromatique visible traverse un réseau en croix en rotation. L'image de diffraction du réseau en croix au repos (taches lumineuses placées en forme de réseau autour du rayon central) se transforme par rotation en des anneaux disposés concentriquement autour de la tache centrale. En utilisant différents filtres de couleur, la dépendance des diamètres d'anneau sur la longueur d'onde de la lumière peut être montrée.

SÉRIE DE BALMER DE L'HYDROGÈNE

P6.2.1.1
Détermination des longueurs d'ondes H_{α} , H_{β} et H_{γ} de la série de Balmer de l'hydrogène

P6.2.1.2
Observation de la série de Balmer de l'hydrogène avec un spectromètre à prisme

P6.2.1.4
Observation de la série de Balmer de l'hydrogène avec d'un spectromètre compact



Détermination des longueurs d'ondes H_{α} , H_{β} et H_{γ} de la série de Balmer de l'hydrogène (P6.2.1.1)

N° de cat.	Désignation	P6.2.1.1	P6.2.1.2	P6.2.1.4
451 13	Lampe de Balmer	1	1	1
451 141	Alimentation pour lampe de Balmer	1	1	1
471 23	Réseau à traits 6000/cm (Rowland)	1		
311 78	Mètre ruban 2 m	1		
460 02	Lentille dans monture, $f = +50$ mm	1		
460 03	Lentille dans monture $f = +100$ mm	1		
460 14	Fente réglable	1		
460 22	Monture-support avec pinces à ressort	1		
441 53	Écran, translucide	1		
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	1		
460 3112	Cavalier avec noix 75/65	6		
467 231	Spectromètre avec goniomètre		1	
467 251	Spectromètre compact, physique			1
460 251	Support pour fibres			1
300 11	Socle			1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)			1

Le spectre d'émission de l'hydrogène atomique contient dans le visible 4 raies H_{α} , H_{β} , H_{γ} and H_{δ} qui se poursuivent en une série complète dans l'ultraviolet.

Au cours de l'expérience P6.2.1.1, une lampe de Balmer remplie de vapeur d'eau sert à l'excitation du spectre d'émission. A l'intérieur de la lampe, les molécules d'eau sont scindées par décharge électrique en un hydrogène atomique excité et en un groupe hydroxyle. On détermine les longueurs d'ondes des raies H_{α} , H_{β} et H_{γ} avec un réseau haute résolution. Les valeurs mesurées sont comparées avec les valeurs calculées selon la formule de Balmer.

Dans l'expérience P6.2.1.2, la série de Balmer est observée à l'aide d'un spectromètre à prisme (système complet).

Dans l'expérience P6.2.1.4, la série de Balmer de l'hydrogène est étudiée sur PC à l'aide d'un spectromètre compact. Le montage optique est très simple, il suffit de tenir l'extrémité de la fibre de verre devant la lampe. On obtient ensuite le spectre d'émission dans le domaine du visible et de l'infrarouge.



Spectre d'émission de l'atome d'hydrogène (P6.2.1.1)

SÉRIE DE BALMER DE L'HYDROGÈNE

P6.2.1.5

Observation du dédoublement des raies de Balmer dans le cas de la deutérum d'hydrogène (dédoublement isotopique) - Observation de la division de la ligne avec une construction de télescope



Observation du dédoublement des raies de Balmer dans le cas de la deutérum d'hydrogène (dédoublement isotopique) - Observation de la division de la ligne avec une construction de télescope (P6.2.1.5)

N° de cat.	Désignation	P6.2.1.5
451 41	Lampe de Balmer au deutérium	1
451 141	Alimentation pour lampe de Balmer	1
460 02	Lentille dans monture, f = +50 mm	1
460 08	Lentille dans monture, f = +150 mm	1
460 09	Lentille dans monture, f = +300 mm	1
460 14	Fente réglable	1
471 27	Réseau d'holographie 24000/cm	1
460 135	Oculaire avec échelle graduée	1
460 32	Banc d'optique à profil normalisé, 1 m	1
460 335	Banc d'optique à profil normalisé, 0,5 m	1
460 341	Charnière rotative avec échelle	1
460 374	Cavalier 90/50 pour l'optique	6

La série de Balmer de l'atome d'hydrogène correspond aux transitions électroniques de niveaux d'énergie ($m: 3, 4, 5, \dots$) vers le niveau 2 de l'état quantique (nombre quantique principal $n = 2$). Les longueurs d'ondes des photons émis correspondent à :

$$\frac{c}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad R = \text{Rydberg constant}$$

On considère que la masse du noyau de l'atome est très grande par rapport à la masse de l'électron. Pour un calcul précis de la constante de Rydberg, la masse diminuée doit être prise en compte. Raison pour laquelle, les constantes de Rydberg R_H de l'hydrogène et R_D de l'isotope d'hydrogène deutérium diffèrent, car le noyau de ce dernier est constitué d'un proton et d'un neutron. Les raies spectrales de la série de Balmer du deutérium sont dès lors par rapport aux raies de l'hydrogène déplacées vers des longueurs d'onde un peu plus petites. Ce phénomène s'appelle le dédoublement de l'isotope.

Dans l'expérience P6.2.1.5, les raies de Balmer sont étudiées à l'aide d'un montage de spectromètre à haute résolution. On utilise ici un réseau holographique avec des constantes de réseau g . Le dédoublement des longueurs d'onde est calculé à l'aide de l'angle β du maximum à l'ordre 1 et l'angle de dédoublement $\Delta\beta$, comme suit :

SPECTRES D'ÉMISSION ET D'ABSORPTION

P6.2.2.1
Représentation des spectres de raies de gaz rares et de vapeurs métalliques

P6.2.2.2
Etude qualitative du spectre d'absorption du sodium



Représentation des spectres de raies de gaz rares et de vapeurs métalliques (P6.2.2.1)

N° de cat.	Désignation	P6.2.2.1	P6.2.2.2
451 011	Lampe spectrale Ne	1	
451 041	Lampe spectrale Cd	1	
451 062	Lampe spectrale Hg 100	1	
451 111	Lampe spectrale Na	1	1
451 16	Carter pour lampes spectrales	1	1
451 30	Bobine de self universelle 230 V, 50 Hz	1	1
471 23	Réseau à traits 6000/cm (Rowland)	1	
311 78	Mètre ruban 2 m	1	
460 02	Lentille dans monture, f = +50 mm	1	
460 03	Lentille dans monture f = +100 mm	1	
460 14	Fente réglable	1	
460 22	Monture-support avec pinces à ressort	1	
441 53	Écran, translucide	1	1
460 310	Banc d'optique, profil S1, 1 m	1	
460 311	Cavalier avec noix 45/65	1	
460 312	Cavalier avec noix 45/35	5	
450 60	Carter de lampe avec câble		1
450 511	Ampoules 6 V/ 30 W, E14, jeu de 2		1
521 210	Transformateur 6/12 V, 30 W		1
300 02	Pied en V, petit		2
300 11	Socle		1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø		2
666 711	Bec autonome à butagaz		1
666 712ET3	Cartouche de gaz butane, 190 g, lot de 3		1
301 01	Noix Leybold		2
666 962	Spatule double, acier inoxydable, 150 mm		1
673 0840	Bâton de magnésium, lot de 25		1
673 5700	Chlorure de sodium 250 g		1

Lorsqu'un électron de la couche extérieure d'un atome ou d'un ion passe d'un état excité d'énergie E_2 à un état de moindre énergie E_1 , il peut y avoir émission d'un photon avec la fréquence

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

h : constante de Planck

Dans le cas inverse, le même photon est absorbé. Comme les énergies E_1 et E_2 ne peuvent prendre que des valeurs discrètes, les photons ne sont émis ou absorbés qu'avec des fréquences discrètes. On appelle spectre de l'atome la totalité des fréquences qui apparaissent. La position des raies spectrales est caractéristique de l'élément étudié.

Durant l'expérience P6.2.2.1, on procède à la décomposition spectrale des spectres d'émission de vapeurs métalliques et de gaz rares (mercure, sodium, cadmium et néon) avec un réseau haute définition pour les projeter ensuite sur un écran afin de les comparer.

Au cours de l'expérience P6.2.2.2, on fait tour à tour rayonner de la lumière blanche puis de la lumière de vapeur de sodium dans la flamme d'un bec Bunsen tout en observant ce qui se passe sur un écran. Si du sodium est consommé dans la flamme, une ombre sombre apparaît sur l'écran lorsque de la lumière de vapeur de sodium traverse cette flamme. On peut en conclure que la lumière émise d'une lampe à vapeur de sodium est absorbée par la vapeur de sodium et que pendant l'absorption et l'émission, les mêmes états atomiques sont mis en jeu.



Spectres d'émission (P6.2.2.1)

SPECTRES D'ÉMISSION ET
D'ABSORPTION

P6.2.2.3
Etude du spectre d'une lampe à vapeur de mercure



Etude du spectre d'une lampe à vapeur de mercure (P6.2.2.3)

N° de cat.	Désignation	P6.2.2.3
451 15	Lampe haute pression au mercure, dans boîtier	1
451 195	Alimentation pour lampe haute pression au mercure	1
460 02	Lentille dans monture, f = +50 mm	1
460 08	Lentille dans monture, f = +150 mm	1
460 09	Lentille dans monture, f = +300 mm	1
460 14	Fente réglable	1
471 27	Réseau d'holographie 24000/cm	1
441 531	Écran	1
460 135	Oculaire avec échelle graduée	1
460 335	Banc d'optique à profil normalisé, 0,5 m	1
460 32	Banc d'optique à profil normalisé, 1 m	1
460 341	Charnière rotative avec échelle	1
460 373	Cavalier 60/50 pour l'optique	1
460 374	Cavalier 90/50 pour l'optique	4
460 382	Cavalier à colonne inclinable 90/50	1

Les raies spectrales proviennent du passage des électrons des niveaux énergétiques élevés vers des moins élevés des enveloppes d'un atome excité. Les longueurs d'onde de la lumière émise résulte de la différence de cette énergie :

$$\Delta E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Des niveaux d'énergie du mercure résulte un nombre élevé de raies de différentes intensités (probabilités de transition) qu'on observe dans le domaine visible ou dont on prouve l'existence près du domaine des UV.

Dans l'expérience P6.2.2.3, les raies spectrales d'une lampe à vapeur de mercure haute pression sont étudiées à l'aide d'un montage de spectre à haute résolution. A cet effet, on utilise une réseau holographique. L'interférence résulte de la réflexion de sorte que l'intensité des raies est importante. Les différentes raies sont observées et les longueurs d'onde déterminées, plus particulièrement la raie jaune, verte, bleue, violette ainsi que la ultraviolette. De plus, chaque raie est précisément étudiée, comme par exemple la double raie jaune et les différences des longueurs d'onde déterminées.

SPECTRES D'ÉMISSION ET D'ABSORPTION

P6.2.2.4

Enregistrement des spectres d'émission lors du test à la flamme

P6.2.2.5

Enregistrement des raies de Fraunhofer à l'aide d'un spectromètre compact

P6.2.2.6

Enregistrement de spectres de lampes à décharge de gaz à l'aide d'un spectromètre compact



Enregistrement des spectres d'émission lors du test à la flamme (P6.2.2.4)

N° de cat.	Désignation	P6.2.2.4	P6.2.2.5	P6.2.2.6
467 251	Spectromètre compact, physique	1	1	1
460 251	Support pour fibres	1	1*	1
300 11	Socle	1	1*	1
666 711	Bec autonome à butagaz	1		
666 712ET3	Cartouche de gaz butane, 190 g, lot de 3	1		
666 731	Allume-gaz, mécanique	1		
673 0840	Bâton de magnésie, lot de 25	1		
604 5681	Spatule à poudre, acier inoxydable, 150 mm	1		
667 089	Plaque à gouttes, 17 mm Ø	1		
661 088	Sels pour coloration de flamme, jeu de 9	1		
674 6950	Acide chlorhydrique, 0,1 mol/l, 500 ml	1		
467 63	Tube spectral Hg (avec Ar)			1
467 67	Tube spectral He			1
467 68	Tube spectral Ar			1
467 69	Tube spectral Ne			1
467 81	Support pour tubes spectraux			1
521 70	Alimentation haute tension 10 kV			1
536 251	Résistance de mesure 100 kΩ			1
300 02	Pied en V, petit			1
300 40	Tige 10 cm, 12 mm Ø			1
301 01	Noix Leybold			1
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge			1
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu			1
500 611	Câble de connexion de sécurité, 25 cm, rouge			1
500 610	Câble de connexion de sécurité, 25 cm, jaune/vert			1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1	1

* complément recommandé

Lorsqu'un électron de la couche extérieure d'un atome ou d'un ion passe d'un état excité d'énergie E_2 à un état de moindre énergie E_1 , il peut y avoir émission d'un photon avec la fréquence

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

h : constante de Planck

Dans le cas inverse, le même photon est absorbé. Comme les énergies E_1 et E_2 ne peuvent prendre que des valeurs discrètes, les photons ne sont émis ou absorbés qu'avec des fréquences discrètes. On appelle spectre de l'atome la totalité des fréquences qui apparaissent. La position des raies spectrales est caractéristique de l'élément étudié.

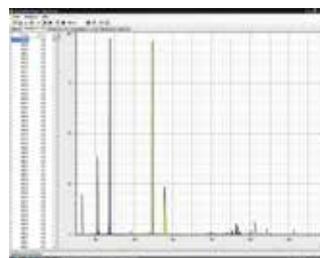
Les raies spectrales proviennent du passage des électrons des niveaux énergétiques élevés vers des moins élevés des enveloppes d'un atome excité. Les longueurs d'onde de la lumière émise résulte de la différence de cette énergie :

$$\Delta E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Dans l'expérience P6.2.2.4, les colorations des flammes par des sels métalliques sont étudiées. Un spectromètre compact connecté à un ordinateur par câble USB permet un enregistrement simple des processus transitoires et l'analyse de raies apparentes. Contrairement à une observation classique à l'oeil, les raies sont également visibles dans le domaine infrarouge, par exemple le potassium.

Dans l'expérience P6.2.2.5, les raies d'absorption de Fraunhofer sont identifiées dans le spectre du soleil permettant ainsi l'identification de nombreux éléments contenus dans la couche de photosphère.

Dans l'expérience P6.2.2.6, l'émission des spectres des lampes à décharge de gaz est étudié à l'aide d'un spectromètre compact et facile à manier.



Spectres d'émission de lampes à gaz (P6.2.2.6)



EXPÉRIENCE DE FRANCK ET HERTZ

P6.2.4.1

Expérience de Franck-Hertz avec le mercure - Tracé avec l'oscilloscope

P6.2.4.2

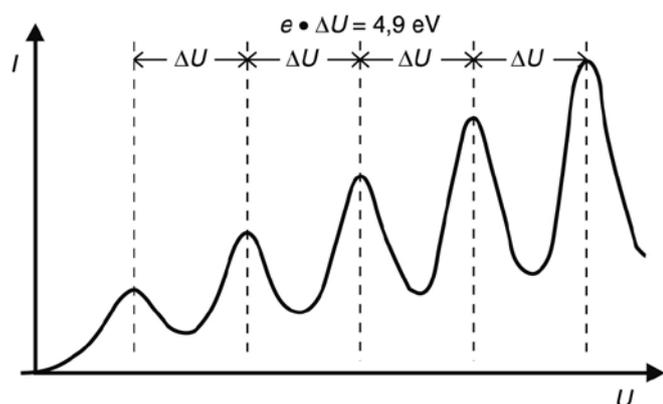
Expérience de Franck-Hertz avec le mercure - Tracé et évaluation avec CASSY

Expérience de Franck-Hertz avec le mercure - Tracé avec l'oscilloscope (P6.2.4.1)

N° de cat.	Désignation	P6.2.4.1	P6.2.4.2
555 854	Tube de Franck-Hertz au mercure	1	1
555 864	Douille de connexion pour tube de Franck-Hertz au mercure, connecteur DIN	1	1
555 81	Four électrique tubulaire, 230 V	1	1
555 880	Alimentation Franck-Hertz	1	1
666 193	Sonde de température NiCr-Ni, 1,5 mm	1	1
575 304	Oscilloscope à mémoire numérique 70 MHz à deux canaux	1	
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	2	
524 013	Sensor-CASSY 2		1
524 220	CASSY Lab 2		1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire		2
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		1

En 1914, *J. Franck* et *G. Hertz* ont exposé leurs travaux sur l'abandon d'énergie discontinu lorsque des électrons traversent de la vapeur de mercure, ainsi que sur l'émission de la raie spectrale ultraviolette ($\lambda = 254 \text{ nm}$) du mercure qui y est liée. Quelques mois plus tard, Niels Bohr reconnut dans leur expérience une preuve du modèle atomique qu'il avait développé.

L'expérience est proposée en deux variantes, expériences P6.2.4.1 et P6.2.4.2, qui se différencient l'une de l'autre uniquement par le tracé et l'exploitation des données mesurées. Les atomes de mercure se trouvent dans une tétrode avec cathode, électrode de commande en forme de grille, grille d'accélération et collecteur. On règle à la cathode un courant d'émission approximativement constant avec l'électrode de commande. Il y a une tension inverse entre grille d'accélération et collecteur. Lorsque la tension accélératrice U entre la cathode et la grille d'accélération augmente, le courant de collecteur I suit de son mieux la caractéristique de la tétrode, après que la tension inverse a été dépassée. Dès que l'énergie cinétique des électrons suffit pour exciter les atomes de mercure par choc inélastique, les électrons ne peuvent plus atteindre le collecteur et le courant de collecteur diminue. Pour cette tension accélératrice, la zone d'excitation se trouve juste devant la grille d'accélération. Si l'on continue d'augmenter la tension accélératrice, la zone d'excitation migre vers la cathode, les électrons peuvent à nouveau absorber de l'énergie sur leur trajet vers la grille et le courant de collecteur se remet à augmenter. Enfin, les électrons peuvent exciter les atomes de mercure pour la seconde fois, le courant de collecteur diminue à nouveau et ainsi de suite. La caractéristique $I(U)$ présente ainsi des variations périodiques à l'occasion desquelles l'écartement des minima $\Delta U = 4,9 \text{ V}$ correspond à l'énergie d'excitation des atomes de mercure de l'état fondamental 1S_0 vers le premier état 3P_1 .



Courbe de Franck et Hertz pour le mercure (P6.2.4.1)

EXPÉRIENCE DE
FRANCK ET HERTZ

P6.2.4.3
Expérience de Franck-Hertz avec le néon - Tracé avec l'oscilloscope

P6.2.4.4
Expérience de Franck et Hertz avec le néon - Tracé et exploitation avec CASSY

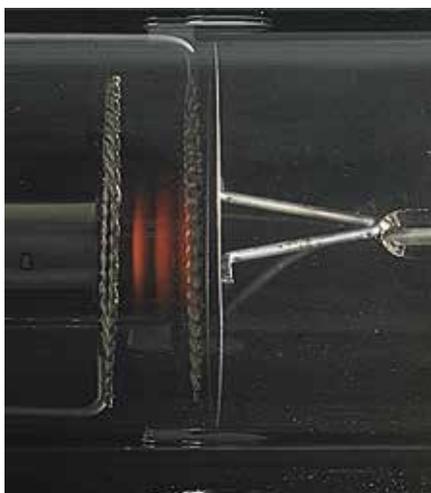


Expérience de Franck et Hertz avec le néon - Tracé et exploitation avec CASSY (P6.2.4.4)

N° de cat.	Désignation	P6.2.4.3	P6.2.4.4
555 870	Tube de Franck-Hertz au néon	1	1
555 871	Support pour tube de Franck-Hertz au néon	1	1
555 872	Câble de connexion FH-Ne, 6 pôles	1	1
555 880	Alimentation Franck-Hertz	1	1
575 304	Oscilloscope à mémoire numérique 70 MHz à deux canaux	1	
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	2	
524 013	Sensor-CASSY 2		1
524 220	CASSY Lab 2		1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire		2
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		1

L'excitation d'atomes de néon par un choc électronique inélastique a lieu pour une pression du gaz de 10 hPa avec la plus grande probabilité dans des états situés à environ 18,7 eV au-delà de l'état fondamental. La désexcitation de ces états peut se faire par émission de photons empruntant des états intermédiaires. La longueur d'onde des photons dans le visible est située entre le rouge et le vert. La lumière émise peut s'observer à l'œil nu et se mesurer par exemple avec le spectroscope scolaire (467 112).

L'expérience de Franck et Hertz avec le néon est proposée en deux variantes expériences P6.2.4.3 et P6.2.4.4, qui se différencient l'une de l'autre uniquement par le tracé et l'exploitation des données mesurées. Dans les deux variantes, les atomes de néon sont dans un tube en verre avec quatre électrodes: la cathode K , l'électrode de commande G_1 en forme de grille, la grille d'accélération G_2 et l'électrode collectrice A . Tout comme pour l'expérience de Franck et Hertz avec le mercure, on augmente continuellement la tension accélératrice U et on mesure le courant I des électrons sur le collecteur capables de surmonter la tension inverse entre G_2 et A . Le courant de collecteur est toujours minimal lorsque l'énergie cinétique juste avant la grille G_2 suffit tout juste à l'excitation par collision des atomes de néon et se remet à augmenter pour une tension accélératrice plus élevée. Entre les grilles G_1 et G_2 , on observe des couches rougeâtres nettement séparées les unes des autres dont le nombre augmente au fur et à mesure que la tension augmente. Il s'agit de zones à forte densité d'excitation dans lesquelles les atomes excités émettent de la lumière spectrale.



Couches lumineuses entre l'électrode de commande et la grille d'accélération (P6.2.4.3-4)

RÉSONANCE DE SPIN ÉLECTRONIQUE (RSE)

P6.2.6.2

Résonance de spin électronique sur du DPPH - Détermination du champ magnétique en fonction de la fréquence de résonance

P6.2.6.3

Absorption résonnante d'un circuit oscillant de haute fréquence (HF) passif



Résonance de spin électronique sur du DPPH - Détermination du champ magnétique en fonction de la fréquence de résonance (P6.2.6.2)

N° de cat.	Désignation	P6.2.6.2	P6.2.6.3
514 55	Appareil de base RSE	1	1
514 571	Alimentation RSE	1	1
555 604	Paire de bobines de Helmholtz	1	
575 304	Oscilloscope à mémoire numérique 70 MHz à deux canaux	1	1
501 02	Câble HF, 1 m	2	
300 11	Socle	3	2
501 20	Câble d'expérimentation 32 A, 25 cm, rouge	1	
501 25	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, rouge	1	
501 26	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, bleu	1	
531 120	Multimètre LD analog 20		1
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm		1
501 644	Douilles de raccordement, noires, jeu de 6		1
590 13	Tige perforée		1

Le couple magnétique de l'électron non apparié ayant un moment total j prend dans un champ magnétique les états d'énergie discrets

$$E_m = -g_j \cdot \mu_B \cdot m \cdot B \quad \text{avec } m = -j, -j + 1, \dots, j$$

$$\mu_B = 9,274 \cdot 10^{-24} \frac{\text{J}}{\text{T}} : \text{magnéton de Bohr}$$

g_j : facteur g (facteur de Landé)

Un second champ magnétique de haute fréquence ν perpendiculaire au premier excite les transitions entre les états d'énergie voisins lorsque cette condition de résonance

$$h \cdot \nu = E_{m+1} - E_m$$

h : constante de Planck

est remplie. Ce fait est la base de la résonance de spin électronique pour laquelle le signal de résonance est mis en évidence à l'aide de hautes fréquences. Les électrons peuvent souvent être considérés comme libres. Le facteur g s'écarte alors légèrement de celui de l'électron libre ($g = 2,0023$) et la fréquence de résonance ν vaut environ 27,8 MHz dans un champ magnétique de 1 mT. Les champs magnétiques intérieurs de la substance étudiée, produits par les moments magnétiques des électrons et noyaux voisins, sont le sujet d'étude proprement dit de la résonance de spin.

Durant l'expérience P6.2.6.2, on met en évidence la résonance de spin électronique avec du diphénylpicrylhydrazyle (DPPH). Le DPPH est un radical dans lequel un atome d'azote présente un électron libre. Au cours de l'expérience les fréquences de résonance peuvent être spécifiées en continu entre 13 et 130 MHz. Le but de l'exploitation est de déterminer le facteur g .

L'objet de l'expérience P6.2.6.3 est la mise en évidence de l'absorption résonnante avec un circuit oscillant passif.

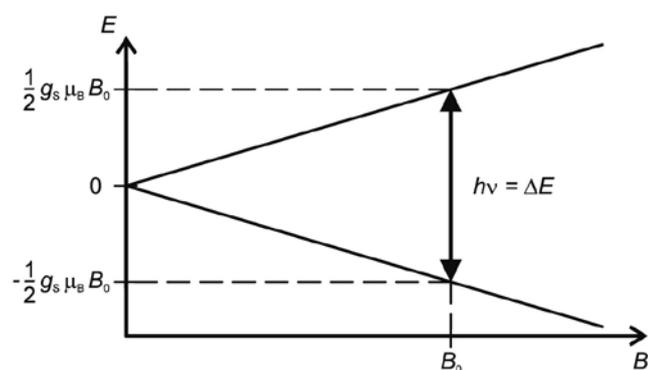


Schéma de la condition de résonance pour des électrons libres (P6.2.6.2)

EFFET ZEEMAN NORMAL

P6.2.7.3

Observation de l'effet Zeeman normal dans une configuration transversale et longitudinale - Spectroscopie avec un étalon de Fabry-Pérot

P6.2.7.4

Mesure du clivage selon Zeeman de la raie rouge du cadmium en fonction du champ magnétique - Spectroscopie avec un étalon de Fabry-Pérot



Observation de l'effet Zeeman normal dans une configuration transversale et longitudinale - Spectroscopie avec un étalon de Fabry-Pérot (P6.2.7.3)

N° de cat.	Désignation	P6.2.7.3	P6.2.7.4
451 12	Lampe spectrale au cadmium, sur plaque support	1	1
451 30	Bobine de self universelle 230 V, 50 Hz	1	1
562 11	Noyau en U avec joug	1	1
562 131	Bobine à 480 spires, 10 A	2	2
560 315	Pièces polaires à grand perçage, paire	1	1
521 551	Alimentation CA/CC 0...24 V/0...10 A	1	1
471 221	Étalon de Fabry-Pérot, dans montage	1	1
460 08	Lentille dans montage, f = +150 mm	2	2
472 601	Lame quart d'onde, 140 nm	1	
472 401	Filtre polarisant	1	
468 41	Support pour filtre interférentiel	1	1
468 400	Filtre interférentiel, 644 nm	1	1
460 135	Oculaire avec échelle graduée	1	1
460 32	Banc d'optique à profil normalisé, 1 m	1	1
460 381	Cavalier large à filetage	1	1
460 373	Cavalier 60/50 pour l'optique	7	5
501 30	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, rouge	1	1
501 31	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, bleu	2	2
662 1584	WEBCAM avec USB 1080p		1
688 801	Tige avec photo filetage 1/4", 10 x 112,5 mm		1
460 374	Cavalier 90/50 pour l'optique		1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN		1
524 0381	Sonde B combinée S		1
501 11	Câble rallonge, à 15 pôles		1
300 02	Pied en V, petit		1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm Ø		1
301 01	Noix Leybold		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		1

On appelle effet Zeeman le clivage de niveaux d'énergie atomiques dans un champ magnétique extérieur ayant pour conséquence la subdivision des transitions entre niveaux. Cet effet a été prédit par *H. A. Lorentz* 1895 puis confirmé expérimentalement un an plus tard par *P. Zeeman*. Zeeman observa la raie rouge du cadmium ($\lambda = 643,8 \text{ nm}$) et remarqua qu'il y avait perpendiculairement au champ magnétique non pas une raie isolée mais un triplet et parallèlement à ce même champ un doublet. On découvrit plus tard avec d'autres éléments des clivages plus compliqués que l'on appela effet Zeeman anormal. Il fut mis en évidence que l'effet Zeeman normal était l'exception puisqu'il n'a lieu qu'avec des transitions entre niveaux atomiques de spin total $S = 0$.

Durant l'expérience P6.2.7.3, on observe l'effet Zeeman sur la raie rouge du cadmium perpendiculairement et parallèlement au champ magnétique puis on détermine l'état de polarisation des diverses composantes Zeeman. Les observations sont expliquées avec la caractéristique de rayonnement d'une radiation de dipôle. Ladite composante π correspond à un dipôle de Hertz oscillant parallèlement au champ magnétique, c.-à-d. qu'elle ne peut pas être observée parallèlement au champ magnétique et qu'elle émet de la lumière à polarisation linéaire perpendiculairement au champ magnétique. Les deux composantes σ correspondent à deux dipôles oscillant perpendiculairement l'un par rapport à l'autre avec un déphasage de 90° . Ils émettent de la lumière à polarisation circulaire en direction du champ magnétique et, perpendiculairement à celui-ci, de la lumière polarisée linéairement.

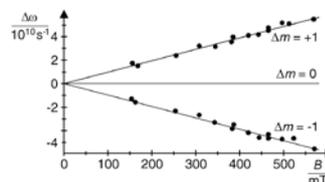
Dans l'expérience P6.2.7.4, on mesure le clivage selon Zeeman de la raie rouge du cadmium en fonction du champ magnétique B . La charge spécifique de l'électron est calculée d'après l'écart énergétique des composantes d'un triplet

$$\Delta E = \frac{h}{4\pi} \cdot \frac{e}{m_e} \cdot B$$

m_e : masse de l'électron, e : charge élémentaire

h : constante de Planck

B : induction magnétique



Clivage selon Zeeman en fonction du champ magnétique (P6.2.7.2+4).

MISE EN ÉVIDENCE DE RAYONS X

P6.3.1.1
Fluorescence d'un écran luminescent par rayons X

P6.3.1.2
Radiographie: noircissement d'un stock de film par rayons X

P6.3.1.5
Etude d'un modèle d'implantation

P6.3.1.6
Influence d'un agent contrasté sur l'absorption de rayons X



Etude d'un modèle d'implantation (P6.3.1.5)

N° de cat.	Désignation	P6.3.1.1	P6.3.1.2	P6.3.1.5	P6.3.1.6
554 800	Appareil de base à rayons X	1	1	1	1
554 861	Tube à rayons X, Mo	1	1	1	1
554 838	Porte-film X-ray		1	1	
554 895	Film pour rayons X		1		
554 8391	Modèle d'implant			1	
554 839	Modèle de vaisseau sanguin pour produits de contraste				1
602 023	Bécher Boro 3.3, 150 ml, forme basse				1
602 295	Flacon en verre brun				1
602 783	Baguette en verre, 200 mm x 6 mm Ø				1
672 6610	Iodure de potassium, 100 g				1

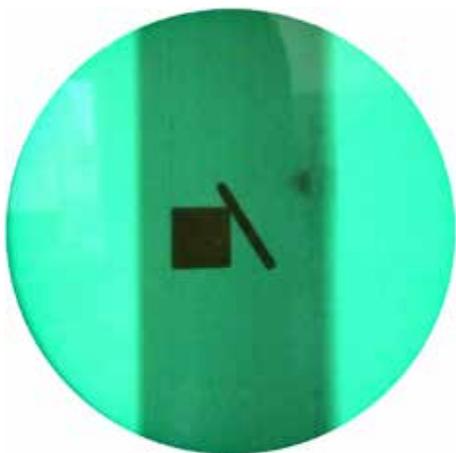
Juste après la découverte des rayons X par *W. C. Röntgen*, on utilisa pour des examens médicaux la capacité de ce rayonnement à traverser des matériaux que la lumière ne peut pas traverser. On applique encore aujourd'hui à l'étude d'images radiographiques la possibilité d'exciter par rayons X un écran fluoescnt pour donner de la lumière, en utilisant toutefois des intensificateurs d'image. Le noircissement d'un film par rayons X trouve des applications aussi bien dans les diagnostics médicaux que dans l'analyse de matériaux et constitue la base de la dosimétrie avec des films.

Durant l'expérience P6.3.1.1, on démontre que des rayons X peuvent traverser la matière sur l'exemple d'objet simples dont les éléments sont constitués de matériaux avec des propriétés d'absorption différentes. Pour mettre en évidence les rayons X, on utilise un écran luminescent en sulfite de cadmium zinc dans lequel les atomes sont excités par absorption de rayons X et émettent des photons dans le domaine spectral visible. On étudie l'influence du courant d'émission / du tube à rayons X sur la luminosité et celle de la haute tension U sur le contraste de l'image apparaissant sur l'écran luminescent.

Dans l'expérience P6.3.1.2, on montre la radioscopie de certains objets avec un film à rayons X. La mesure du temps d'exposition nécessaire à un noircissement précis du film permet d'obtenir des informations quantitatives sur l'intensité des rayons X.

Au cours de l'expérience P6.3.1.5 on démontre l'utilisation de la radioscopie pour dépister un objet caché. Une tige en métal à l'intérieur d'un billot en bois n'est pas visible de l'extérieur, mais sur la radiographie sur l'écran fluoescnt on le voit très bien et l'on peut ainsi le mesurer.

Dans l'expérience P6.3.1.6 on montre l'utilisation de produits de contraste. Une cavité à l'intérieur d'une plaque remplie d'une solution de iodure est bien visible sur la radioscopie, par contre quand elle est remplie d'eau ceci n'est pas visible.

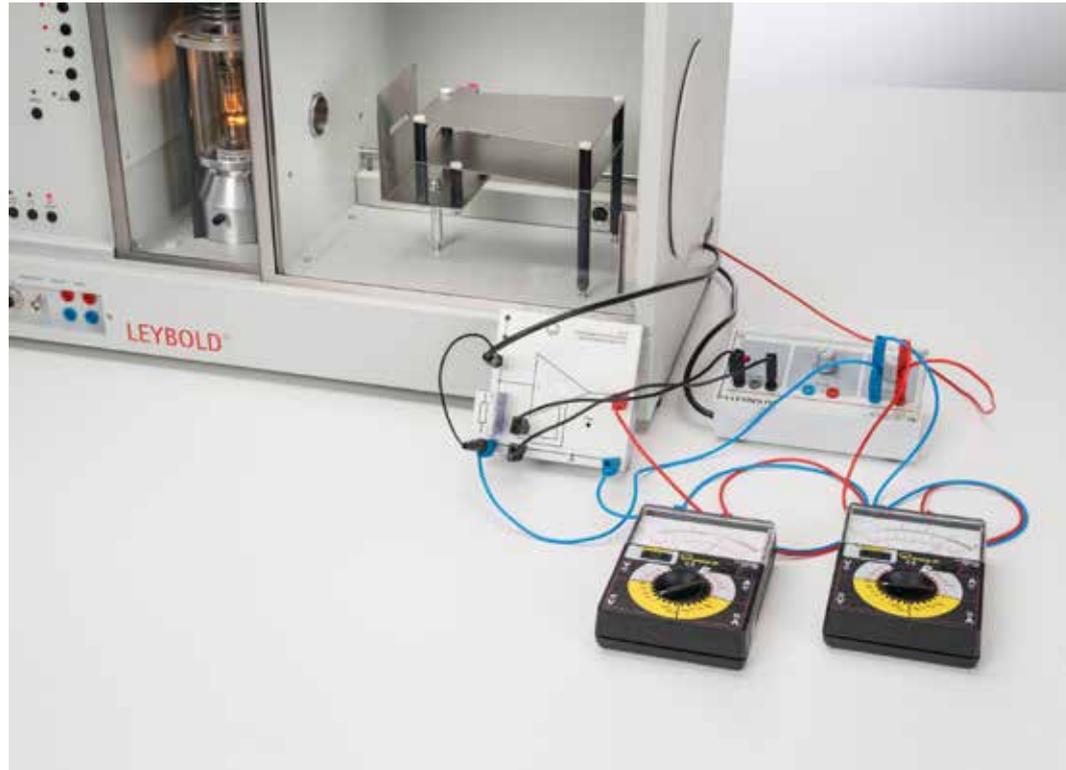


Ecran du modèle d'implant (P6.3.1.5)

MISE EN ÉVIDENCE
DE RAYONS X

P6.3.1.3
Mise en évidence de rayons X avec
une chambre d'ionisation

P6.3.1.4
Détermination du débit de dose ionique
de tubes à rayons X avec anode en
molybdène



Mise en évidence de rayons X avec une chambre d'ionisation (P6.3.1.3)

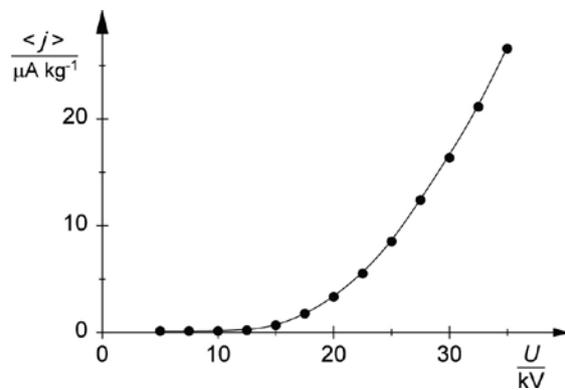
N° de cat.	Désignation	P6.3.1.3-4
554 800	Appareil de base à rayons X	1
554 861	Tube à rayons X, Mo	1
554 840	Condensateur à plaques X-ray	1
522 27	Alimentation 450 V	1
532 14	Amplificateur électromètre	1
577 02	Résistance 1 Gohm, STE 2/19	1
531 120	Multimètre LDanalog 20	2
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	1
501 451	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, noirs, paire	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1
501 45	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, rouge/bleu, paire	2

Comme les rayons X ionisent les gaz, ils peuvent être mesurés par le courant d'ionisation d'une chambre d'ionisation.

Les rayons X dans une chambre d'ionisation font l'objet des expériences P6.3.1.3 et P6.3.1.4. D'une part, leur courant d'ionisation est tracé en fonction de la tension aux bornes du condensateur à plaques de la chambre et on identifie la zone de saturation des caractéristiques. D'autre part, on calcule le débit de dose ionique

$$\bar{j} = \frac{I_{\text{ion}}}{m}$$

d'après le courant d'ionisation I_{ion} , provoqué par les rayons X dans le volume d'air V radiographié de la chambre d'ionisation puis on calcule la masse m de l'air radiographié. Les mesures sont effectuées pour différents courants d'émission I et différentes haute tensions U du tube à rayons X.



Débit de dose ionique moyen j en fonction de la haute tension U du tube (pour $I = 1,0 \text{ mA}$).

MISE EN ÉVIDENCE
DE RAYONS X

P6.3.1.11
Radiographie numérique avec le
module de tomodensitométrie

P6.3.1.12
Radiographie numérique avec le
capteur pour radiographie



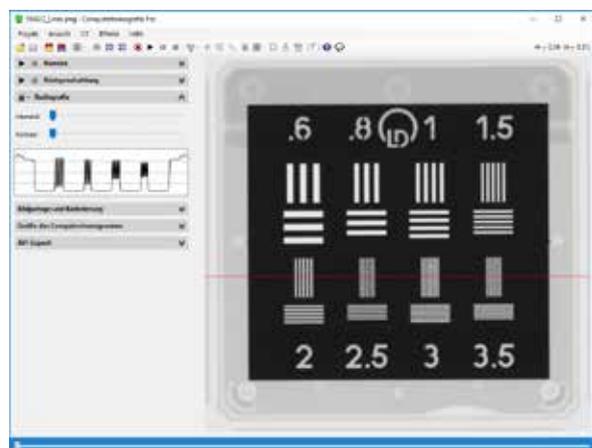
Radiographie numérique avec le capteur pour radiographie (P6.3.1.12)

N° de cat.	Désignation	P6.3.1.11	P6.3.1.12
554 800	Appareil de base à rayons X	1	1
554 866	Tube à rayons X, Au	1	1
554 821	Module de tomodensitométrie	1	
554 838	Porte-film X-ray	1	
554 8382	Porte-objet X-ray 1	1	
554 834	Accessoires pour l'absorption X-ray	1	1
554 822	Modèles d'essai, 2D	1	1
554 8281	Capteur pour radiographie		1
554 8291	Chariot de positionnement de précision du capteur pour radiographie		1
554 8292	Porte-objet X-ray 2		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1

Pour la radiographie par rayons X et le traitement des images, il est essentiel de connaître les propriétés de la source de rayonnement utilisée et de l'objet considéré. La résolution minimale est définie par la taille du foyer de l'anode. La qualité de l'image, soit le contraste et donc la visibilité des détails, est définie par l'absorption en fonction de la longueur d'onde de différents matériaux et du spectre du tube à rayons X.

The experiment P6.3.1.11 measures the attenuation of X-rays through the quantitative analysis of a digital X-ray image on the computer, the contrast of a digital X-ray image as a function of the energy and intensity of x-radiation is measured and the resolution digital radiographs is determined using various test images.

The experiment P6.3.1.12 measures the attenuation of X-rays through the quantitative analysis of a digital X-ray image on the computer, the contrast of a digital X-ray image as a function of the energy and intensity of x-radiation is measured, the resolution digital radiographs is determined using various test images and the focal spot of the anode of the x-ray tube is measured by a simple geometric projection on the X-ray image sensor.



Radiographie de l'objet à tester

ATTÉNUATION DE RAYONS X

P6.3.2.1

Étude de l'atténuation de rayons X en fonction du matériau d'absorption et de l'épaisseur d'absorption

P6.3.2.2

Etude du coefficient d'atténuation en fonction de la longueur d'onde

P6.3.2.3

Etude du coefficient d'atténuation en fonction du nombre atomique Z

P6.3.2.4

Atténuation de rayons X en fonction de la distance



Étude de l'atténuation de rayons X en fonction du matériau d'absorption et de l'épaisseur d'absorption (P6.3.2.1)

N° de cat.	Désignation	P6.3.2.1	P6.3.2.2	P6.3.2.3	P6.3.2.4
554 800	Appareil de base à rayons X	1	1	1	1
554 861	Tube à rayons X, Mo	1	1	1	
554 831	Goniomètre	1	1	1	
559 01	Tube compteur à fenêtre pour rayonnements α , β , γ et X avec câble	1	1	1	
554 834	Accessoires pour l'absorption X-ray	1			
554 78	Cristal de NaCl pour la réflexion de Bragg		1	1	
554 832	Lot de films d'absorption		1	1	
554 866	Tube à rayons X, Au				1
554 8281	Capteur pour radiographie				1
554 8291	Chariot de positionnement de précision du capteur pour radiographie				1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		1		1

L'atténuation de rayons X à la traversée d'un absorbeur d'épaisseur d est décrite par la loi d'absorption de Lambert:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

I_0 : intensité de rayonnement primaire

I : intensité transmise

Dans ce cas, l'absorption des rayons X aussi bien que leur dispersion dans l'absorbeur contribuent à l'atténuation. Le coefficient d'atténuation linéaire μ dépend du matériau de l'absorbeur et de la longueur d'onde λ des rayons X. On peut observer une arête d'absorption, c.-à-d. une transition abrupte d'une zone de plus faible absorption vers une zone d'absorption plus importante, lorsque l'énergie $h \cdot \nu$ du quantum de rayonnement X dépasse l'énergie nécessaire à la séparation d'un électron d'une des couches atomiques internes des atomes de l'absorbeur.

Font l'objet de l'expérience P6.3.2.1, la vérification expérimentale de la loi d'absorption de Lambert sur l'exemple de l'aluminium et la détermination pour six matériaux d'absorption différents du coefficient d'atténuation μ moyen sur l'ensemble du spectre du tube à rayons X.

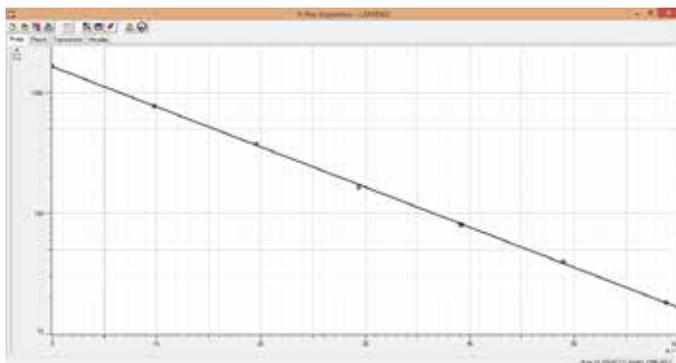
Durant l'expérience P6.3.2.2, on trace les courbes de transmission

$$T(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}$$

pour différents matériaux d'absorption. Le but de l'exploitation est de vérifier l'influence de λ^3 du coefficient d'atténuation pour des longueurs d'onde en dehors des arêtes d'absorption.

Dans l'expérience P6.3.2.3, on détermine le coefficient d'atténuation $\mu(\lambda)$ de différents matériaux d'absorption pour une longueur d'onde λ située en dehors des arêtes d'absorption. Il en ressort que les coefficients d'atténuation croissent en bonne approximation proportionnellement à la quatrième puissance du numéro atomique Z des absorbeurs.

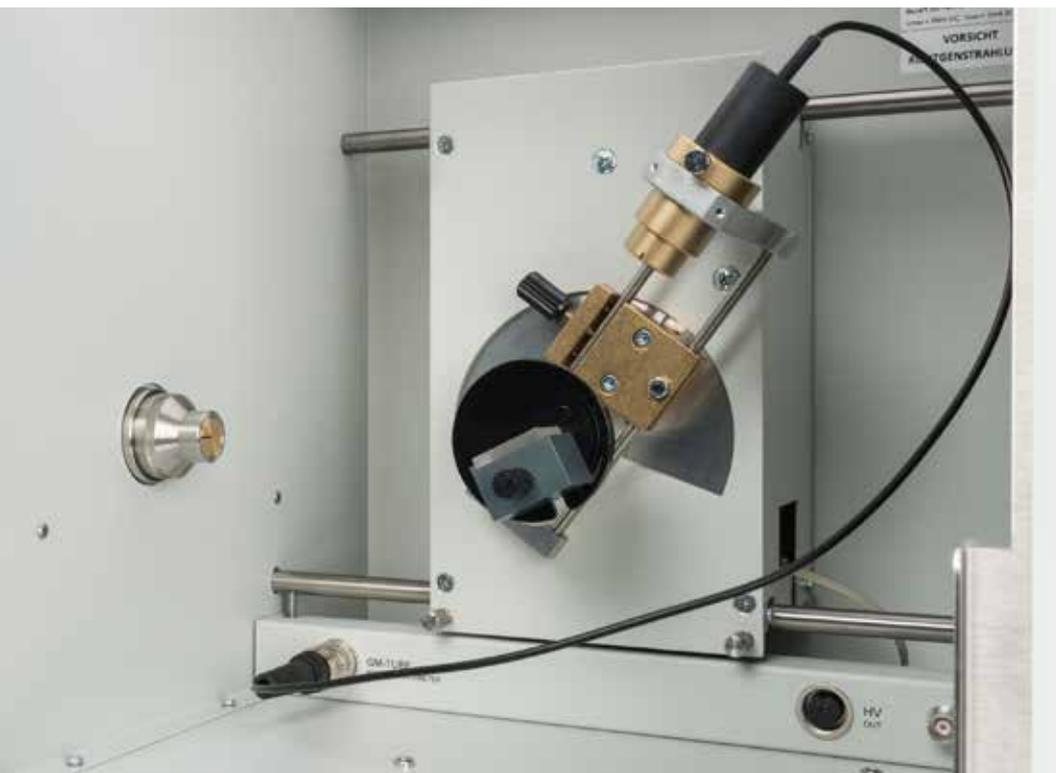
Dans l'expérience P6.3.2.4, il s'agit de mesurer l'intensité du rayonnement X à une distance variable du tube à rayons X. Ce faisant, on vérifie la loi de l'inverse du carré de la distance.



Étudier l'atténuation des rayons X en fonction de l'épaisseur de l'absorbeur (P6.3.2.1).

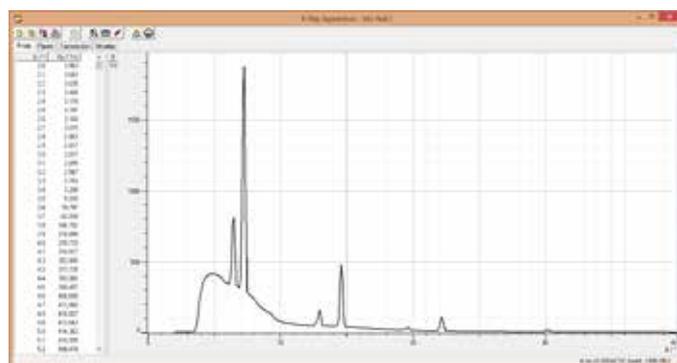
PHYSIQUE CORTÈGE
ÉLECTRONIQUE

- P6.3.3.1
Réflexion de Bragg: diffraction de rayons X sur un monocristal
- P6.3.3.2
Etude du spectre d'énergie d'un tube à rayons X en fonction d'une haute tension et du courant d'émission
- P6.3.3.3
Loi du déplacement de Duane-Hunt et détermination de la constante de Planck
- P6.3.3.5
Pic d'absorption: filtrage de rayons X
- P6.3.3.6
Loi de Moseley et détermination de la constante de Rydberg



Etude du spectre d'énergie d'un tube à rayons X en fonction d'une haute tension et du courant d'émission (P6.3.3.2)

N° de cat.	Désignation	P6.3.3.1-3	P6.3.3.5	P6.3.3.6
554 801	Appareil à rayons X Mo, complet	1	1	1
559 01	Tube compteur à fenêtre pour rayonnements α , β , γ et X avec câble	1	1	1
554 832	Lot de films d'absorption			1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1	1



Spectre de Bragg d'une anode en molybdène (P6.3.3.1).

Le rayonnement d'un tube à rayons X a deux composantes: un rayonnement de freinage continu apparaît lorsque les électrons rapides sont ralentis dans l'anode. Un rayonnement caractéristique composé de raies isolées est causé par les transitions des électrons vers les couches internes des atomes du matériau de l'anode desquelles un électron a été enlevé par collision.

Au cours de l'expérience P6.3.3.1, on étudie la diffraction par un monocristal de NaCl des raies caractéristiques K_{α} et K_{β} de l'anode en molybdène pour vérifier la nature ondulatoire des rayons X. Cette diffraction s'explique par la loi de la réflexion de Bragg.

Dans l'expérience P6.3.3.2, on trace le spectre d'énergie du tube à rayons X en fonction de la haute tension et du courant d'émission, avec un goniomètre dans un montage de Bragg. On étudie la répartition spectrale du spectre continu du rayonnement de freinage et l'intensité des raies caractéristiques.

Durant l'expérience P6.3.3.3, on mesure la haute tension U du tube à rayons X en fonction de la longueur d'onde limite λ_{min} du spectre continu du rayonnement de freinage. On obtient la constante de Planck h avec la loi des déplacements de Duane et Hunte après les valeurs mesurées.

L'objet de l'expérience P6.3.3.5 est le filtrage de rayons X par l'arête d'absorption d'un absorbeur, c.-à-d. une transition abrupte d'une zone de faible absorption vers une zone d'absorption plus importante.

Dans l'expérience P6.3.3.6, on détermine la longueur d'onde λ_K des arêtes d'absorption en fonction du numéro atomique Z . On obtient la constante de Rydberg R et le blindage moyen s avec la loi de Moseley d'après les données mesurées.

SPECTROSCOPIE D'ÉNERGIE DE RAYONS X

P6.3.5.1
Enregistrement et calibrage d'un spectre d'énergie de rayons X

P6.3.5.2
Enregistrement du spectre d'énergie d'une anode en molybdène

P6.3.5.3
Enregistrement du spectre d'énergie d'une anode en cuivre

P6.3.5.4
Étude de spectres caractéristiques en fonction du numéro atomique de l'élément : les raies K

P6.3.5.5
Étude de spectres caractéristiques en fonction du numéro atomique de l'élément : Les couches L

P6.3.5.6
Réflexion de Bragg dissoute par l'énergie à différents ordres de diffraction



Enregistrement et calibrage d'un spectre d'énergie de rayons X (P6.3.5.1)

N° de cat.	Désignation	P6.3.5.1-2	P6.3.5.3	P6.3.5.4	P6.3.5.5	P6.3.5.6
554 800	Appareil de base à rayons X	1	1	1	1	1
554 861	Tube à rayons X, Mo	1		1	1	
554 831	Goniomètre	1	1	1	1	1
559 938	Détecteur d'énergie de rayonnement X	1	1	1	1	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1	1	1	1	1
524 220	CASSY Lab 2	1	1	1	1	1
524 058	Adaptateur AMC	1	1	1	1	1
501 02	Câble HF, 1 m	1	1	1	1	1
554 862	Tube à rayons X, Cu		1			1
554 844	Cibles fluorescence des raies K, jeu			1		
554 846	Cibles fluorescence des raies L, jeu				1	
554 78	Cristal de NaCl pour la réflexion de Bragg					1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1	1	1	1

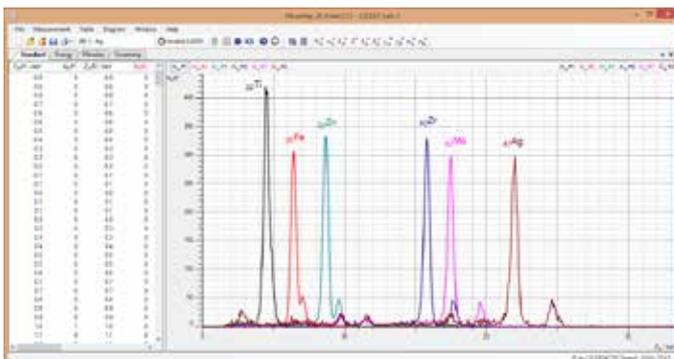
Le détecteur d'énergie de rayonnement X permet de relever des spectres de rayons X. Le détecteur consiste d'une photodiode à refroidissement par effet Peltier dans laquelle les rayons X entrants produisent des paires d'électrons libres/trous dont le nombre est proportionnel à l'énergie de rayon X. L'analyse de la hauteur d'impulsions est exécutée à l'aide de CASSY en fonction d'analyseur d'impulsions multicanal connecté à un ordinateur.

L'objet de l'expérience P6.3.5.1 est l'étude de matériaux connus par analyse à fluorescence X pour calibrer l'axe d'énergie du spectre à l'aide des raies K_{α} et K_{β} . On utilise de l'acier zingué permettant la mesure de plusieurs raies à la fois. Les expériences P6.3.5.2 et P6.3.5.3 se consacrent à la mesure directe de spectres emission de deux tube à rayons X et d'anodes en cuivre ou en molybdène. Les spectres montrent les raies caractéristiques du matériau d'anode ainsi que le rayonnement continu de freinage.

L'expérience P6.3.5.4 démontre les différences de fluorescence X des raies K (transitions vers la couche K) pour différents éléments chimiques. Ceci sert d'une part à confirmer la loi de Moseley et d'autre part à démontrer les possibilités d'analyse non destructive des matériaux.

L'expérience P6.3.5.5 montre des raies L caractéristiques d'éléments plus lourds en démontrant l'émission de rayons X à la transition vers la couche L.

Dans l'expérience P6.3.5.6 on utilise le détecteur d'énergie de rayons X dans la géométrie de Bragg pour observer simultanément les différentes énergies de rayons X, c'est-à-dire l'influence d'énergies sur l'intensité des rayons diffusés.



Fluorescence des rayons X de différents éléments (P6.3.5.4-5)



STRUCTURE DES SPECTRES DU RAYON X

P6.3.6.1
Structure fine du faisceau du rayon X caractéristique d'une anode en molybdène

P6.3.6.2
Structure fine du faisceau du rayon X caractéristique d'une anode en cuivre

P6.3.6.3
Structure fine du faisceau du rayon X caractéristique d'une anode en fer

P6.3.6.4
Structure fine de rayons X caractéristiques d'une anode en argent

P6.3.6.5
Structure fine du faisceau du rayon X caractéristique d'une anode en tungstène

P6.3.6.6
Détermination de l'énergie de liaison de la coquille inférieure par excitation sélective

P6.3.6.7
Structure fine du faisceau du rayon X caractéristique d'une anode en or

Structure fine du faisceau du rayon X caractéristique d'une anode en molybdène (P6.3.6.1)

N° de cat.	Désignation	P6.3.6.1	P6.3.6.2	P6.3.6.3	P6.3.6.4	P6.3.6.5-6	P6.3.6.7
554 800	Appareil de base à rayons X	1	1	1	1	1	1
554 861	Tube à rayons X, Mo	1					
554 831	Goniomètre	1	1	1	1	1	1
554 78	Cristal de NaCl pour la réflexion de Bragg	1			1		
559 01	Tube compteur à fenêtre pour rayonnements α , β , γ et X avec câble	1	1	1	1	1	1
554 862	Tube à rayons X, Cu		1				
554 791	Cristal de KBr pour la réflexion de Bragg		1				
554 863	Tube à rayons X, Fe			1			
554 77	Cristal de LiF pour la réflexion de Bragg			1		1	1
554 865	Tube à rayons X, Ag				1		
554 864	Tube à rayons X, W					1	
554 866	Tube à rayons X, Au						1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1	1	1	1	1

La structure et la structure fine des spectres à rayons X fournissent des informations de grande valeur sur la position des différents niveaux d'énergie. Les transitions systématiques de rayons X est représenté en commençant par le molybdène, la présentation des transitions des couches K d'éléments plus lourds et plus légers est complétée par des matériaux de l'anode, tels que l'argent et le fer. Contrairement aux matériaux légers de l'anode, les éléments lourds, tel que le tungstène, montrent une émission caractéristique des couches L, qui fournit une série de détails sur la structure de la couche puisque le niveau de base est aussi fissionné et peut être excité sélectivement.

Dans l'expérience P6.3.6.1, on mesure le spectre des rayons X d'une anode en molybdène et on observe la structure fine de la ligne K_{α} .

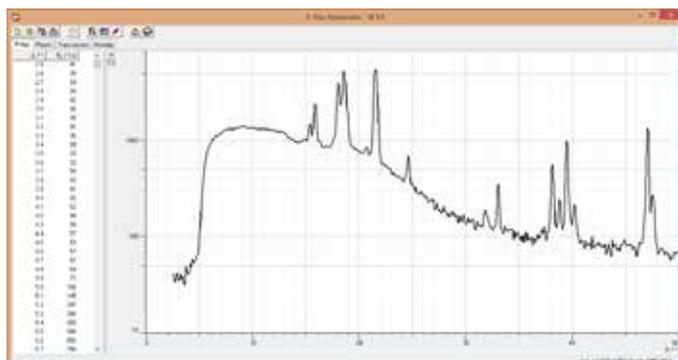
Dans les expériences P6.3.6.2 et P6.3.6.3, on étudie le rayonnement caractéristique de basse énergie de l'anode en cuivre et de l'anode en fer et on mesure la structure fine de la raie K_{α} .

Dans l'expérience P6.3.6.4 on étudie le rayonnement caractéristique de haute énergie de l'anode en argent ainsi que la fission de la structure fine du fait du couplage spin-orbite.

L'expérience P6.3.6.5 consiste à mettre en évidence la structure fine des raies L d'émission d'une anode en tungstène. Du fait de la fission de tous les niveaux impliqués, on peut observer près de 11 transitions ($L_{\alpha 1-2}$, $L_{\beta 1-4}$, $L_{\gamma 1-3}$, L_i , L_v), ce qui permet de tirer des conclusions détaillées sur les différents niveaux d'énergie et les transitions possibles.

L'expérience P6.3.6.6 pour la mesure directe de la fission de la couche L, est un supplément à P6.3.6.5. On excite d'abord seulement la sous-couche L3 sous tension accélération modérée, les sous-couches L2 et plus tard L1 et leurs raies sont ajoutées à des tensions plus hautes. Ceci permet la mesure directe de l'énergie des différentes sous-couches L.

Dans l'expérience P6.3.6.7, on met en évidence la structure fine des raies L d'émission d'une anode en or. Du fait de la fission de tous les niveaux impliqués, on peut observer près de 10 transitions ($L_{\alpha 1-2}$, $L_{\beta 1-4}$, $L_{\gamma 1-3}$, L_i , L_v), ce qui permet de tirer des conclusions détaillées sur les différents niveaux d'énergie et les transitions possibles.



Spectre de Bragg de l'anode en tungstène (P6.3.6.5).

STRUCTURE DES SPECTRES
DU RAYON X

P6.3.6.11
Structure fine à haute résolution des rayons X caractéristiques d'une anode en molybdène

P6.3.6.12
Structure fine à haute résolution des rayons X caractéristiques d'une anode en cuivre

P6.3.6.13
Structure fine à haute résolution des rayons X caractéristiques d'une anode en fer

P6.3.6.14
Structure fine à haute résolution des rayons X caractéristiques d'une anode en argent

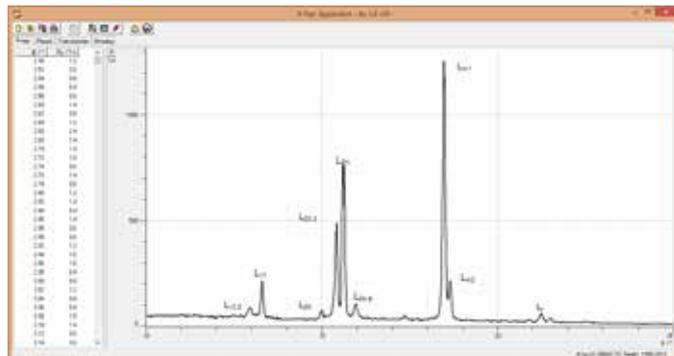
P6.3.6.15
Structure fine à haute résolution des rayons X caractéristiques d'une anode en tungstène

P6.3.6.17
Structure fine à haute résolution des rayons X caractéristiques d'une anode en or



Structure fine à haute résolution des rayons X caractéristiques d'une anode en molybdène (P6.3.6.11)

N° de cat.	Désignation	P6.3.6.11	P6.3.6.12	P6.3.6.13	P6.3.6.14	P6.3.6.15	P6.3.6.17
554 800	Appareil de base à rayons X	1	1	1	1	1	1
554 861	Tube à rayons X, Mo	1					
554 831	Goniomètre	1	1	1	1	1	1
554 835	Accessoires HD X-ray	1	1	1	1	1	1
554 78	Cristal de NaCl pour la réflexion de Bragg	1			1		
559 01	Tube compteur à fenêtre pour rayonnements α , β , γ et X avec câble	1	1	1	1	1	1
554 862	Tube à rayons X, Cu		1				
554 77	Cristal de LiF pour la réflexion de Bragg		1	1		1	1
554 863	Tube à rayons X, Fe			1			
554 865	Tube à rayons X, Ag				1		
554 864	Tube à rayons X, W					1	
554 866	Tube à rayons X, Au						1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1		1	1	1	1



Spectre de Bragg à haute résolution d'une anode en or (P6.3.6.17).

La résolution des spectres de rayons X peut être améliorée en utilisant des fentes plus étroites dans le collimateur et le détecteur. En combinaison avec un goniomètre qui peut traiter des pas plus petits, la structure fine des spectres de rayons X peut également être résolue au premier ordre, ce qui permet de gagner du temps pendant la mesure.

L'utilisation de fentes de différentes largeurs permet également d'étudier l'intensité du rayonnement de la ligne atomique par rapport à l'intensité du continuum dû au bremsstrahlung des électrons.

Dans l'expérience P6.3.6.11, on mesure le spectre haute résolution des rayons X d'une anode en molybdène et on observe la structure fine de la raie K_{α} .

Dans les expériences P6.3.6.12 et P6.3.6.13, on étudie le rayonnement caractéristique de basse énergie de l'anode en cuivre et de l'anode en fer et on mesure la fine structure à haute résolution de la raie K_{α} .

Dans l'expérience P6.3.6.14, on étudie le rayonnement caractéristique de haute énergie de l'anode en argent ainsi que la fission de la structure fine à haute résolution du fait du couplage spin-orbite.

L'expérience P6.3.6.15 consiste à mettre en évidence la structure fine à haute résolution des raies L d'émission d'une anode en tungstène. Du fait de la fission de tous les niveaux impliqués, on peut observer près de 10 transitions ($L_{\alpha 1-2}$, $L_{\beta 1-5}$, $L_{\gamma 1-3}$), ce qui permet de tirer des conclusions détaillées sur les différents niveaux d'énergie et les transitions possibles.

Dans l'expérience P6.3.6.17, on met en évidence la structure fine des raies L d'émission d'une anode en or. Du fait de la fission de tous les niveaux impliqués, on peut observer près de 10 transitions ($L_{\alpha 1-2}$, $L_{\beta 1-4}$, $L_{\gamma 1-3}$, L_{δ} , L_{ν}), ce qui permet de tirer des conclusions détaillées sur les différents niveaux d'énergie et les transitions possibles.

**EFFET COMPTON
SUR RAYONS X**

P6.3.7.1
Effet Compton: Mise en évidence de la perte d'énergie du quantum de rayon X dispersé

P6.3.7.2
Effet Compton: Mesure d'énergie des photons dispersés en fonction de l'angle de diffusion



Effet Compton: Mesure d'énergie des photons dispersés en fonction de l'angle de diffusion (P6.3.7.2)

N° de cat.	Désignation	P6.3.7.1	P6.3.7.2
554 800	Appareil de base à rayons X	1	1
554 861	Tube à rayons X, Mo	1	1
554 831	Goniomètre	1	1
559 01	Tube compteur à fenêtre pour rayonnements α , β , γ et X avec câble	1	
554 836	Accessoires pour l'effet Compton X-ray	1	
554 8371	Accessoires pour l'effet Compton X-ray II		1
559 938	Détecteur d'énergie de rayonnement X		1
524 013	Sensor-CASSY 2		1
524 058	Adaptateur AMC		1
524 220	CASSY Lab 2		1
501 02	Câble HF, 1 m		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)		1

Au début des années 20, alors que les discussions portaient sur l'interprétation de l'effet photon, la découverte de l'effet Compton en 1923, qui est la dispersion du faisceau du rayon X aux endroits faiblement liés aux orbites, apportait d'autres arguments sur le faisceau du rayon X dans la représentation des particules appelées photons. Arthur Holly Compton étudia la dispersion du faisceau du rayon X. En physique classique, la fréquence de la dispersion devrait être semblable avant et après le processus de dispersion. Par contre, A. H. Compton observa une baisse de fréquence comme étant la collision d'un proton avec un électron dans la représentation des particules. En physique classique, l'énergie totale et l'impuls total restent constants tandis que la transmission de l'impuls à l'électron dispersé dépend de l'angle de dispersion θ .

Dans l'expérience P6.3.7.1, la variation de la longueur d'onde par la dispersion du Compton à l'aide d'un tube compteur Geiger-Müller est démontrée. Pour cela, un affaiblissement en fonction de la longueur d'onde par un absorbeur est utilisé alternativement avant et après la pièce de dispersion. La transmission par l'absorbeur est plus faible pour la dispersion du faisceau par le Compton que par le faisceau primaire.

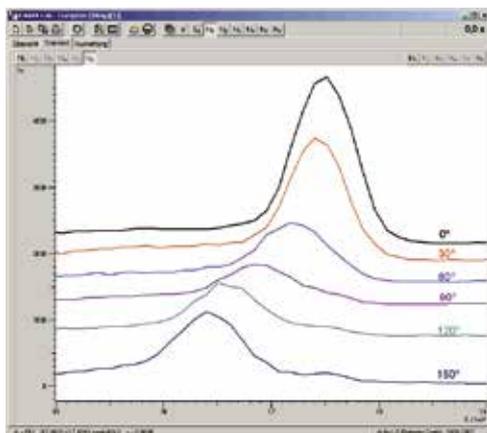
Dans l'expérience P6.3.7.2, les spectres de l'énergie du faisceau de dispersion du rayon X de Compton sont directement mesurés par un détecteur d'énergie du rayon X. L'énergie $E(\theta)$ des photons dispersés est fonction de l'angle de dispersion θ et est comparée à l'énergie calculée résultant du théorème de l'énergie et de l'impuls en considération relative :

$$E(\theta) = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m \cdot c^2} \cdot (1 - \cos \theta)}$$

E_0 : Énergie du photon

m : masse de l'électron au repos

c : vitesse de la lumière



Décalage énergétique des rayons X diffusés à différents angles (P6.3.7.2).

TOMOGRAPHIE À RAYONS X

P6.3.8.1

Enregistrement et représentation d'une série d'images tomодensitométriques avec le module de tomодensitométrie

P6.3.8.2

Examen tomодensitométrique d'objets géométriques simples

P6.3.8.3

Les notions de base en imagerie médicale avec le module de tomодensitométrie

P6.3.8.4

Détermination des coefficients d'absorption et de la densité en unités Hounsfield par examen tomодensitométrique avec le module de tomодensitométrie

P6.3.8.5

Examen tomодensitométrique d'objets biologiques avec le module de tomодensitométrie



Enregistrement et représentation d'une série d'images tomодensitométriques avec le module de tomодensitométrie (P6.3.8.1)

N° de cat.	Désignation	P6.3.8.1	P6.3.8.2-4	P6.3.8.5
554 800	Appareil de base à rayons X	1	1	1
554 831	Goniomètre	1	1	1
554 866	Tube à rayons X, Au	1	1	1
554 821	Module de tomодensitométrie	1	1	1
554 823	Fantôme, 3D		1	
554 825	Adaptateur LEGO®		1	
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1	1

En 1972, le premier scanner à rayons X a été mis au point par Godfrey Hounsfield et, ensemble avec Allan Cormack, ils ont obtenu le Prix Nobel de médecine en 1979. Cette technique de tomographie axiale calculée par ordinateur consiste à reconstruire un objet à partir de la façon dont les rayons X le traversant sont absorbés suivant leurs angles de pénétration.

Notre appareil à rayons X pour l'enseignement permet aussi de radiographier des objets (de préférence avec un tube au Tungstène) et de visualiser les projections correspondantes sur l'écran fluorescent. Ces projections ayant une intensité relativement faible nécessitent une caméra à haute sensibilité pour la saisie. Une telle caméra est insérée dans le module pour la tomographie axiale assistée par ordinateur.

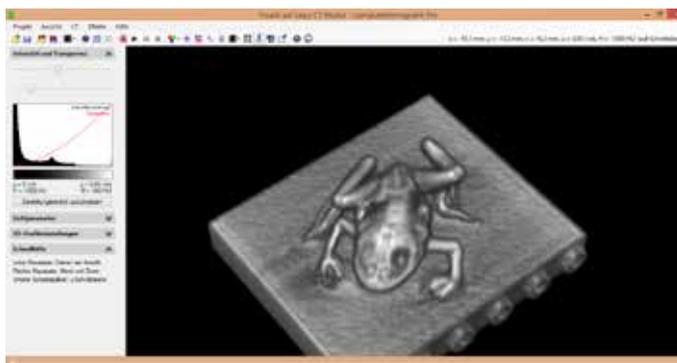
L'expérience P6.3.8.1 est consacrée à l'étude des notions de base de la tomодensitométrie (TDM) ou scanographie ainsi qu'à l'enregistrement et à la représentation des tomogrammes d'objets géométriques simples.

Dans l'expérience P6.3.8.2, des objets géométriques simples sont étudiés pour comprendre les propriétés élémentaires et le pouvoir de résolution de la tomодensitométrie.

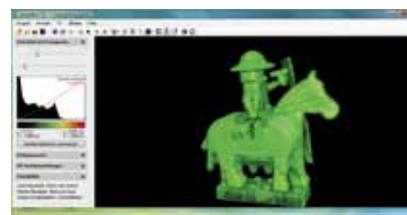
Dans l'expérience P6.3.8.3, des objets en rapport avec la médecine sont étudiés afin de présenter les propriétés élémentaires de la tomодensitométrie ainsi que les problèmes potentiels que posent les artefacts et les erreurs de représentation.

Dans l'expérience P6.3.8.4, on étudie les coefficients d'absorption de l'eau dans un corps plastique pour comprendre les possibilités offertes par la tomодensitométrie pour la différenciation des types de tissus ainsi que pour calibrer en unités Hounsfield et discuter des effets du durcissement de rayon.

Dans l'expérience P6.3.8.5, on étudie des objets biologiques réels à l'aide de la tomодensitométrie et on applique les enseignements tirés des expériences préalables dans un contexte approprié.



Cette petite grenouille a une longueur d'environ 3,5 cm et a été reconstruite avec une résolution de 0,3 mm (P6.3.8.5).



Tomographie par ordinateur d'une figurine Lego (P6.3.8.2).

TOMOGRAPHIE À RAYONS X

P6.3.8.11
Enregistrement et représentation d'une série d'images tomодensitométriques avec le capteur pour radiographie

P6.3.8.12
Examen tomодensitométrique d'objets géométriques simples avec le capteur pour radiographie

P6.3.8.13
Les notions de base en imagerie médicale avec le capteur pour radiographie

P6.3.8.14
Détermination des coefficients d'absorption et de la densité en unités Hounsfield par examen tomодensitométrique avec le capteur pour radiographie

P6.3.8.15
Examen tomодensitométrique d'objets biologiques avec le capteur pour radiographie



Enregistrement et représentation d'une série d'images tomодensitométriques avec le capteur pour radiographie (P6.3.8.11)

N° de cat.	Désignation	P6.3.8.11	P6.3.8.12-4	P6.3.8.15
554 800	Appareil de base à rayons X	1	1	1
554 831	Goniomètre	1	1	1
554 866	Tube à rayons X, Au	1	1	1
554 820P1	Kit tomодensitométrie Pro	1	1	1
554 823	Fantôme, 3D		1	
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1	1

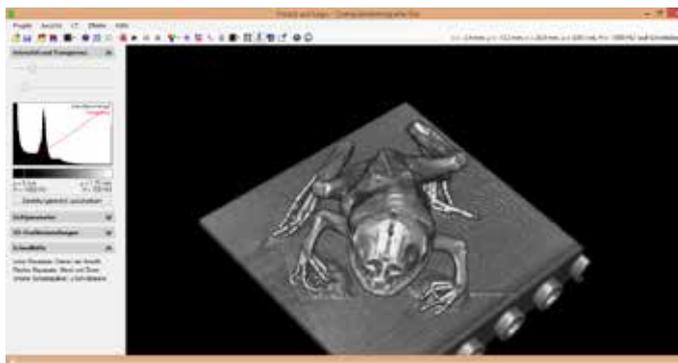
L'expérience P6.3.8.11 est consacrée aux notions de base de la tomодensitométrie (TDM) ou scanographie ainsi qu'à l'enregistrement et à la représentation des tomogrammes d'objets géométriques simples.

Dans l'expérience P6.3.8.12, des objets géométriques simples sont étudiés pour comprendre les propriétés élémentaires et le pouvoir de résolution de la tomодensitométrie.

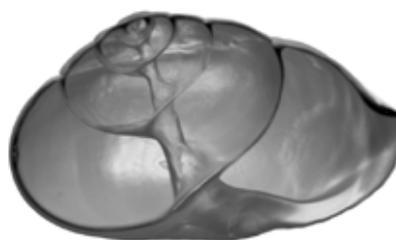
Dans l'expérience P6.3.8.13, des objets en rapport avec la médecine sont étudiés afin de présenter les propriétés élémentaires de la tomодensitométrie ainsi que les problèmes potentiels que posent les artefacts et les erreurs de représentation.

Dans l'expérience P6.3.8.14, on étudie les coefficients d'absorption de l'eau dans un corps plastique pour comprendre les possibilités offertes par la tomодensitométrie pour la différenciation des types de tissus ainsi que pour calibrer en unités Hounsfield et discuter des effets du durcissement de rayon.

Dans l'expérience P6.3.8.15, on étudie des objets biologiques réels à l'aide de la tomодensitométrie et on applique les enseignements tirés des expériences préalables dans un contexte approprié.



La même grenouille que sur la page précédente, mais en utilisant le capteur d'image PRO, la résolution est améliorée à 0,05 mm et le bruit est considérablement réduit (P6.3.8.15).



Tomogrammes calculés à haute résolution d'une coquille d'escargot.

MISE EN ÉVIDENCE D'UN
RAYONNEMENT RADIOACTIF

P6.4.1.4
Relevé de la caractéristique d'un tube
compteur Geiger-Müller

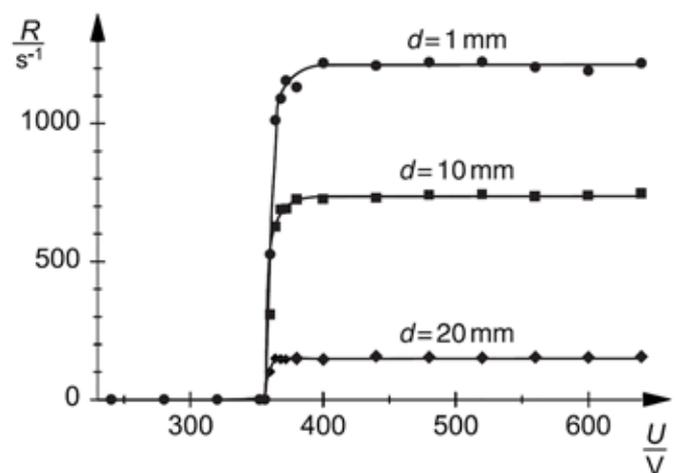


Relevé de la caractéristique d'un tube compteur Geiger-Müller (P6.4.1.4)

N° de cat.	Désignation	P6.4.1.4
559 01	Tube compteur à fenêtre pour rayonnements α , β , γ et X avec câble	1
559 436	Préparation de radium 226, 5 kBq	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1
524 440	Connecteur adaptateur GM M	1
590 13	Tige perforée	1
591 21	Fiche à ressort, grande	1
532 16	Tige de raccordement	1
300 11	Socle	2

C'est en étudiant des sels d'uranium que *H. Becquerel* découvrit la radioactivité en 1895. Il constata l'émission d'un rayonnement qui modifie des matériaux photographiques sensibles à la lumière, même à travers du papier noir. Il découvrit en outre que l'air est ionisé et que le rayonnement peut être identifié à l'aide de l'action ionisante.

Dans l'expérience P6.4.1.4, on relève la caractéristique courant/ tension d'un tube compteur Geiger - Müller. Ici aussi, le courant augmente proportionnellement à la tension lorsque celle-ci est peu élevée et atteint pour des tensions plus importantes une valeur de saturation qui dépend de l'activité ou de l'écartement de la préparation radioactive.



Characteristics of the counter tube (counting rate R as a function of the counter tube voltage U) at three different distances d between preparation and counter tube (P6.4.1.4).

DISTRIBUTION DE POISSON

P6.4.2.1
Variations statistiques lors de la détermination du taux de comptage



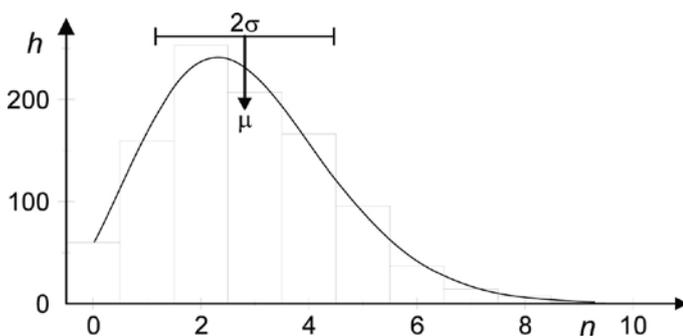
Variations statistiques lors de la détermination du taux de comptage (P6.4.2.1)

N° de cat.	Désignation	P6.4.2.1
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 220	CASSY Lab 2	1
524 0331	Tube compteur GM S	1
559 835	Préparations, jeu de 3	1
591 21	Fiche à ressort, grande	1
590 02	Fiche à ressort, petite	1
532 16	Tige de raccordement	2
300 11	Socle	1*
587 07	Haut-parleur d'aigus	1*
501 45	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, rouge/bleu, paire	1*
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

* complément recommandé

Dans une préparation radioactive, le hasard détermine pour chaque particule isolée si elle se désintègre dans un laps de temps à venir Δt , la probabilité qu'une particule donnée se désintègre dans le laps de temps à venir étant en l'occurrence très faible. Le nombre n de particules qui se désintègrent dans un laps de temps Δt connaît une distribution de Poisson de moyenne μ . Cela signifie que la probabilité que n désintégrations aient lieu dans un laps de temps Δt vaut

Durant l'expérience P6.4.2.1, on se sert d'un système CASSY pour déterminer à plusieurs reprises le nombre n d'impulsions qui provoquent un rayonnement radioactif dans un tube compteur Geiger-Müller pendant un intervalle de temps Δt au choix. Après un total de N comptages, on détermine les fréquences $h(n)$ pour lesquelles on compte à chaque fois n impulsions puis on les représente sous forme d'histogramme.

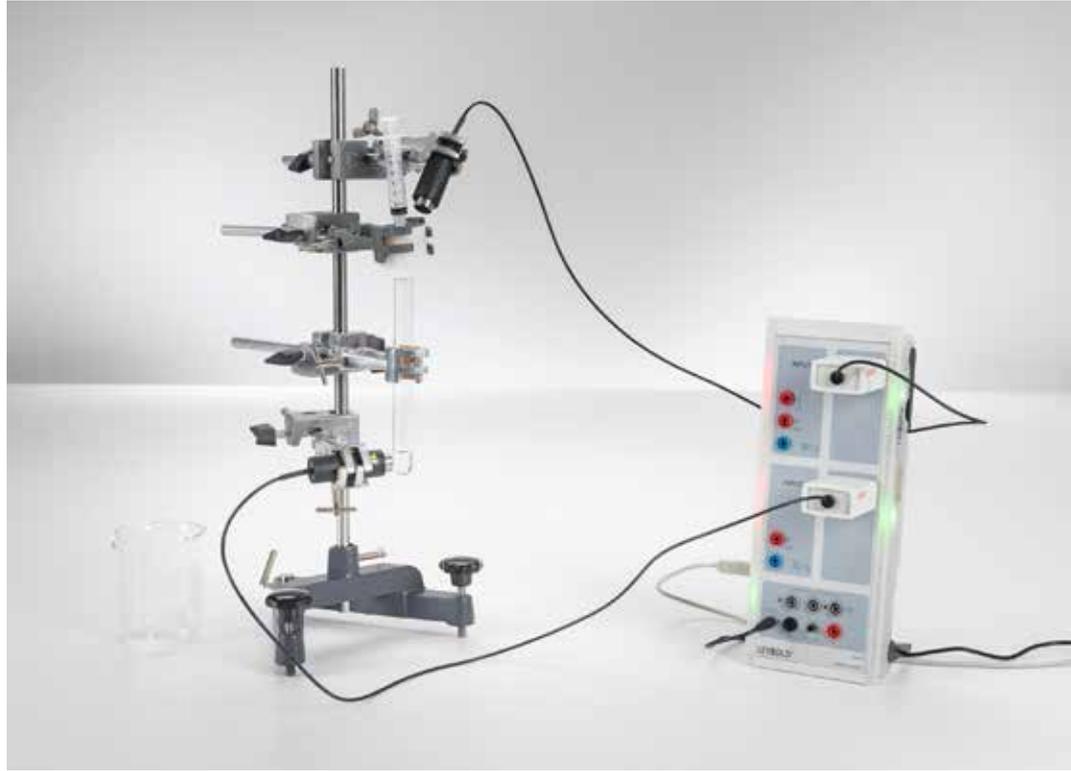


Distribution de Poisson mesurée et calculée Histogramme : $h(n)$, courbe : $N \cdot wB(n)$ (P6.4.2.1)

DÉSINTÉGRATION
RADIOACTIVE ET DEMI-VIE

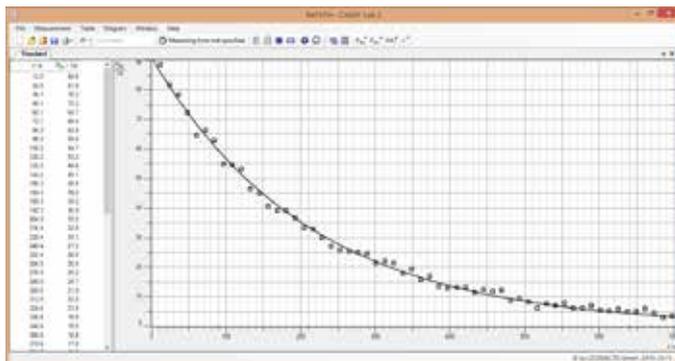
P6.4.3.3
Détermination de la demi-vie du Cs-137 - tracé point par point de la courbe de désintégration

P6.4.3.4
Détermination de la demi-vie du Cs-137 - tracé et évaluation de la courbe de désintégration and de production avec CASSY



Détermination de la demi-vie du Cs-137 - tracé et évaluation de la courbe de désintégration and de production avec CASSY (P6.4.3.4)

N° de cat.	Désignation	P6.4.3.3	P6.4.3.4
559 8150Z	Générateur de radio-isotopes 137mCs/Ba 370 kBq	1	1
559 01	Tube compteur à fenêtre pour rayonnements α , β , γ et X avec câble	1	1
524 440	Connecteur adaptateur GM M	1	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1	1
300 02	Pied en V, petit	1	1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm \emptyset	1	1
301 01	Noix Leybold	2	4
666 555	Pince de serrage universelle 0...80 mm	2	4
664 043	Tube à essais Fiolax, 16 x 160 mm, lot de 10	1	1
664 103	Bécher DURAN, 250 ml, forme basse	1	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1	1
524 220	CASSY Lab 2	1	1
524 0331	Tube compteur GM S	2	1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1



Radioactivité décroissante après élution du Ba-137m (P6.4.3.4).

L'activité d'un échantillon radioactif vaut

$$A(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right|$$

où N est le nombre de noyaux atomiques radioactifs au moment t . Il est vrai que le moment de la désintégration d'un noyau atomique isolé ne peut être prévu. Pourtant, en partant du principe que tous les noyaux ont la même probabilité de désintégration, on remarque que le nombre de noyaux radioactifs a diminué de

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt$$

λ : constante de désintégration

durant l'intervalle de temps dt suivant. La loi de la désintégration

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

N_0 : nombre de noyaux atomiques radioactifs au moment $t = 0$

est ainsi valable pour le nombre N . Cela signifie, entre autres, qu'après la demi-vie

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

le nombre de noyaux radioactifs a été divisé par deux.

Pour déterminer la demi-vie du Ba-137m dans l'expérience P6.4.3.3, on utilise une bouteille en plastique contenant du Cs-137 conservé au sel. Par désintégration, on obtient le métastable isotope Ba-137m par élution. La durée de la demi-vie est d'environ 2,6 minutes.

Dans l'expérience P6.4.3.4, on utilise une bouteille en plastique contenant du Cs-137 radioactif. Le Cs-137 se décompose continuellement en Ba-137m. L'isotope métastable Ba-137m résultant de la désintégration β est éliminé sélectivement par lavage à l'aide d'une seringue avec une solution d'élution. La période de demi-vie est d'environ 2,6 minutes.

A l'aide de deux tubes de comptage, nous pouvons d'abord observer le transfert par élution du Ba-137m radioactif de la bouteille en plastique dans le tube à essai. A l'intérieur du tube à essai, le Ba-137m va se désintégrer exponentiellement au cours du temps en quelques minutes, en même temps, l'activité du Ba-137m à l'intérieur de la bouteille en plastique va se reconstituer. En fin de compte, il y a à nouveau un équilibre dynamique entre la décomposition et la production dans la bouteille en plastique.



ATTÉNUATION DES RAYONNEMENTS α , β ET γ

P6.4.4.2
Atténuation du rayonnement β traversant la matière

P6.4.4.3
Vérification de la loi de l'inverse du carré pour le rayonnement β

P6.4.4.4
Absorption du rayonnement γ traversant la matière

Vérification de la loi de l'inverse du carré pour le rayonnement β (P6.4.4.3)

N° de cat.	Désignation	P6.4.4.2	P6.4.4.3	P6.4.4.4
559 835	Préparations, jeu de 3	1	1	
559 01	Tube compteur à fenêtre pour rayonnements α , β , γ et X avec câble	1	1	1
575 471	Compteur S	1	1	1
559 18	Collimateur avec pastilles d'absorption	1		
590 02	Fiche à ressort, petite	1	1	
591 21	Fiche à ressort, grande	1	1	
532 16	Tige de raccordement	2	2	
300 11	Socle	2	2	
460 97	Règle métallique graduée, 0,5 m		1	
559 845	Mélange de radionucléides α , β , γ			1
559 855	Préparation de cobalt 60, 74 kBq			1
686 651	Plaque d'expérience RAD			1
686 653	Supports pour tube compteur et préparation			1
686 657	Pincettes en plastique, écartement 1,2 cm, jeu de 3			1
686 660	Cadre et 9 plaques, jeu de			1
686 661	Plaques en plomb, 50 x 50 x 2 mm, jeu de 8			1

Les particules de haute énergie α et β ne cèdent qu'une part de leur énergie à la collision avec un atome absorbeur. Plusieurs collisions sont ainsi nécessaires pour freiner complètement une particule. Leur portée R

$$R \propto \frac{E_0^2}{n \cdot Z}$$

dépend de l'énergie initiale E_0 , de la densité des numéros n et du numéro atomique Z des atomes absorbeurs.

Une fraction précise des particules α et β de moindre énergie ou d'un rayonnement γ est freinée voire absorbée à la traversée d'une épaisseur d'absorption d_x . Ces particules peuvent aussi être dispersées et disparaître du faisceau. L'intensité du faisceau décroît ainsi de façon exponentielle avec la distance d'absorption x

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad \mu : \text{coefficient d'atténuation}$$

Durant l'expérience P6.4.4.2, on mesure l'atténuation d'un rayonnement β de Sr-90 dans de l'aluminium, en fonction de l'épaisseur d'absorption d . L'expérience montre une diminution exponentielle de l'intensité.

A des fins de comparaison, on enlève l'absorbeur lors de l'expérience P6.4.4.3 et on fait varier l'écart entre la préparation radioactive β et le tube compteur. Comme on peut s'y attendre avec une source de rayonnement ponctuelle, l'intensité vaut en bonne approximation

$$I(d) \propto \frac{1}{d^2}$$

Dans l'expérience P6.4.4.4, on étudie l'atténuation d'un rayonnement γ au passage dans de la matière. Ici aussi, l'intensité diminue quasiment de façon exponentielle. Le coefficient d'atténuation μ dépend du matériau d'absorption et de l'énergie du rayonnement γ .

**VISUALISATION
DES TRAJECTOIRES
DE PARTICULES**

P6.5.1.1

Visualisation des trajectoires de particules α dans la chambre de Wilson

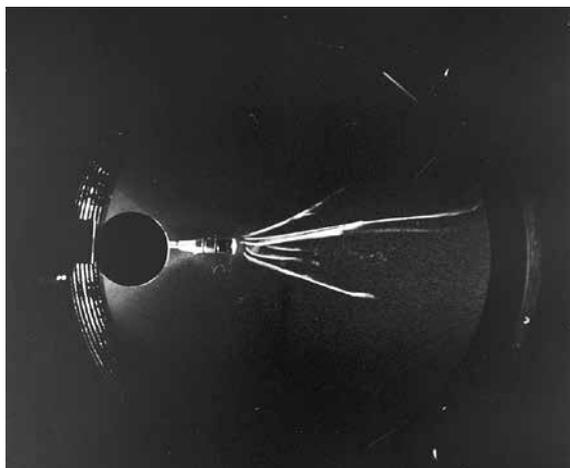


Visualisation des trajectoires de particules α dans la chambre de Wilson (P6.5.1.1)

N° de cat.	Désignation	P6.5.1.1
559 57	Chambre de Wilson selon Schürholz	1
559 596	Préparation de radium 226 pour la chambre de Wilson	1
450 60	Carter de lampe avec câble	1
450 511	Ampoules 6 V/ 30 W, E14, jeu de 2	1
460 20	Condenseur asphérique	1
522 27	Alimentation 450 V	1
521 210	Transformateur 6/12 V, 30 W	1
301 06	Pince de table	1
300 11	Socle	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1
671 9720	Éthanol, solvant, 1 l	1

Dans une chambre à brouillard de Wilson, on amène par expansion adiabatique un mélange saturé d'air, de vapeur d'eau et de vapeur d'alcool à l'état sursaturé pendant un temps très court. La vapeur sursaturée se condense brusquement en gouttelettes de brouillard autour de germes de condensation. Notamment les ions qui surviennent par exemple par des collisions entre particules α et molécules de gaz dans la chambre à brouillard, sont des germes de condensation appropriés.

Durant l'expérience P6.5.1.1, on observe les trajectoires de particules α dans une chambre de Wilson. Elles sont matérialisées pendant une à deux secondes par des traits brillants grâce à la lumière arrivant latéralement, à chaque mouvement saccadé de la pompe. Les ions résiduels sont éliminés de la chambre par un champ électrique.



Traces de gouttelettes dans la chambre de Wilson (P6.5.1.1)

DIFFUSION DE RUTHERFORD

P6.5.2.1

Diffusion de Rutherford : mesure du taux de diffusion en fonction de l'angle de diffusion et du numéro atomique



Diffusion de Rutherford : mesure du taux de diffusion en fonction de l'angle de diffusion et du numéro atomique (P6.5.2.1)

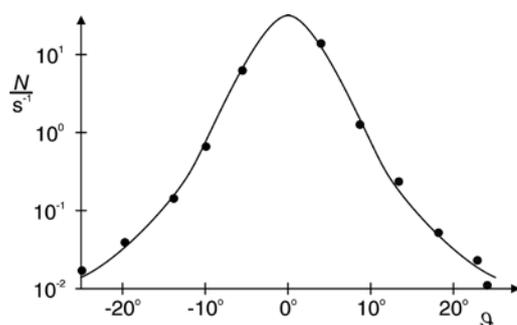
N° de cat.	Désignation	P6.5.2.1
559 820Z	Préparation d'américium 241, 330 kBq	1
559 56	Chambre à diffusion de Rutherford	1
559 52	Feuille d'aluminium dans monture	1
559 931	Préamplificateur de discriminateur	1
562 791	Adaptateur secteur 12 V CA	1
575 471	Compteur S	1
378 73	Pompe à vide à palettes S 1,5	1
378 005	Élément en T DN 16 KF	1
378 040	Anneau de centrage de raccordement DN 10/16 KF	1
378 045	Anneau de centrage DN 16 KF	1
378 050	Anneau de serrage DN 10/16 KF	2
378 771	Vanne d'aération DN 10 KF	1
378 031	Embout DN 16 KF	1
667 186	Tuyau pour vide, 8 mm Ø	1
501 01	Câble HF, 0,25 m	1
575 24	Câble blindé, BNC/4 mm	1

Rutherford, Geiger et Marsden confirmèrent par une des expériences aux conséquences les plus importantes de toute la physique, qu'un atome est «principalement vide». Ils ont fait incider un faisceau de particules α sur une feuille d'or presque sans déviation et que seule une petite minorité est déviée de façon plus importante. Ils en conclurent que les atomes sont constitués d'une couche externe étendue presque sans masse et d'un noyau pratiquement ponctuel.

Au cours de l'expérience P6.5.2.1, on reproduit dans une chambre à vide l'observation d'une préparation radioactive d'américium 241. On mesure le taux de diffusion $N(\vartheta)$ des particules α à l'aide d'un détecteur semi-conducteur, en fonction de l'angle de diffusion ϑ . Pour la diffusion, on dispose d'une feuille d'or ($Z = 80$) et d'une feuille d'aluminium ($Z = 13$). La relation

$$N(\vartheta) \sim \frac{1}{\sin^4 \frac{\vartheta}{2}} \text{ et } N(\vartheta) \sim Z^2$$

est confirmée pour le taux de diffusion.



Taux de diffusion N en fonction de l'angle de diffusion ϑ (P6.5.2.1)

RÉSONANCE MAGNÉTIQUE
NUCLÉAIRE (RMN)

P6.5.3.1
Résonance de spin nucléaire du polystyrène, de la glycérine et du téflon



Résonance de spin nucléaire du polystyrène, de la glycérine et du téflon (P6.5.3.1)

N° de cat.	Désignation	P6.5.3.1
514 602	Alimentation RMN	1
514 606	Tête de mesure RMN	1
562 11	Noyau en U avec joug	1
562 131	Bobine à 480 spires, 10 A	2
521 546	Alimentation CC 0...16 V/0...5 A	1
575 304	Oscilloscope à mémoire numérique 70 MHz à deux canaux	1
501 02	Câble HF, 1 m	2
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	1
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	1
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1*
524 0381	Sonde B combinée S	1*
501 11	Câble rallonge, à 15 pôles	1*

* complément recommandé

Le moment magnétique d'un noyau, lié au spin nucléaire l , prend dans un champ magnétique B les états

$$E_m = -g_l \cdot \mu_K \cdot m \cdot B \text{ avec } m = -l, -l + 1, \dots, l$$

$$\mu_K = 5,051 \cdot 10^{-27} \frac{J}{T} : \text{ magnéton nucléaire}$$

g_l : facteur g du noyau

Un second champ magnétique de fréquence ν , perpendiculaire au premier, excite les transitions entre états d'énergie voisins lorsque ceux-ci remplissent la condition de résonance

$$h \cdot \nu = E_{m+1} - E_m$$

h : constante de Planck

Ce fait est la base de la résonance de spin nucléaire pour laquelle le signal de résonance est mis en évidence par la technique haute fréquence. Pour un noyau d'hydrogène par exemple, la fréquence de résonance vaut 42,5 MHz dans un champ magnétique de 1 T. Sa valeur exacte dépend de l'environnement chimique de l'atome d'hydrogène, puisque le champ local intérieur, produit par les atomes et les noyaux dans l'environnement voisin, agit aussi sur le noyau d'hydrogène, en plus du champ magnétique B extérieur. La largeur du signal de résonance dépend également de la structure de la substance étudiée.

Durant l'expérience P6.5.3.1, on met en évidence la résonance de spin nucléaire du polystyrène, de la glycérine et du Téflon. On exploite la position, la largeur et l'intensité des lignes de résonance.

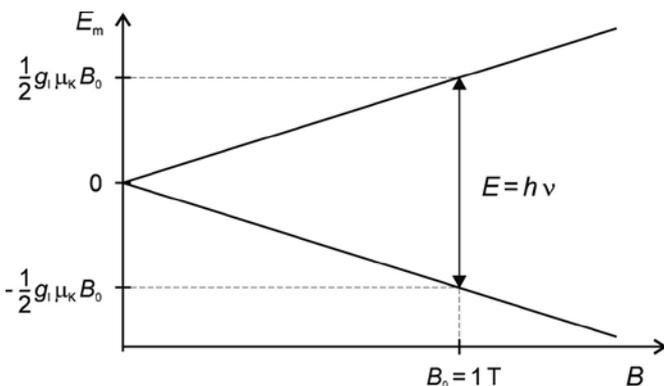
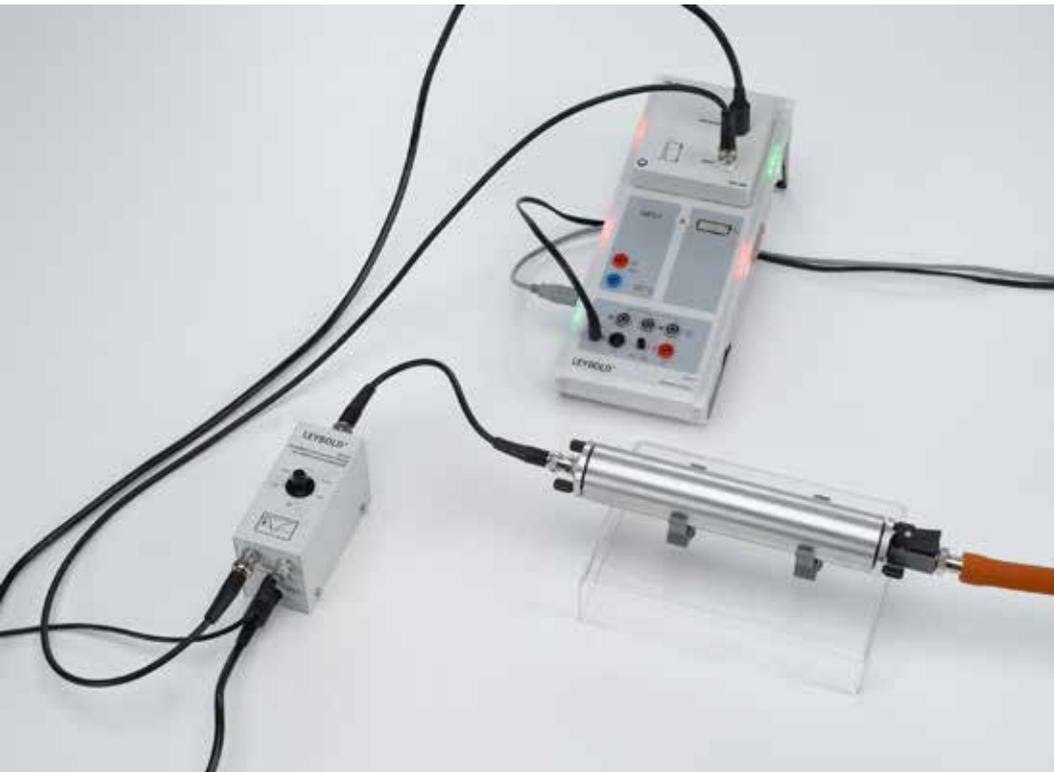


Schéma de la condition de résonance pour des noyaux d'hydrogène (P6.5.3.1)



SPECTROSCOPIE α

- P6.5.4.1 Spectroscopie α sur des échantillons radioactifs
- P6.5.4.2 Détermination de la perte d'énergie du rayonnement α dans l'air
- P6.5.4.3 Détermination de la perte d'énergie du rayonnement α dans l'aluminium et dans l'or
- P6.5.4.4 Détermination de l'âge sur un échantillon de Ra-226
- P6.5.4.5 Structure fine du faisceau du rayonnement α de Am-241

Spectroscopie α sur des échantillons radioactifs (P6.5.4.1)

N° de cat.	Désignation	P6.5.4.1	P6.5.4.2	P6.5.4.3	P6.5.4.4	P6.5.4.5
559 565	Chambre de spectroscopie alpha	1	1	1	1	1
559 921	Détecteur semi-conducteur	1	1	1	1	1
559 825	Préparation d'américium 241, non scellée, 3,7 kBq	1	1	1		1
559 436	Préparation de radium 226, 5 kBq	1		1	1	
524 013	Sensor-CASSY 2	1	1	1	1	1
524 220	CASSY Lab 2	1	1	1	1	1
524 058	Adaptateur AMC	1	1	1	1	1
559 931	Préamplificateur de discriminateur	1	1	1	1	1
501 16	Câble de connexion, à 6 pôles, 1,50 m	1	1	1	1	1
501 02	Câble HF, 1 m	1	1	1	1	1
501 01	Câble HF, 0,25 m	1	1	1	1	1
378 73	Pompe à vide à palettes S 1,5	1	1	1	1	1
378 005	Élément en T DN 16 KF	1		1	1	1
378 040	Anneau de centrage de raccordement DN 10/16 KF	1		1	1	1
378 045	Anneau de centrage DN 16 KF	1	3	1	1	1
378 050	Anneau de serrage DN 10/16 KF	2	3	2	2	2
378 771	Vanne d'aération DN 10 KF	1		1	1	1
378 031	Embout DN 16 KF	1	1	1	1	1
667 186	Tuyau pour vide, 8 mm Ø	1	1	1	1	1
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1*				1*
378 015	Élément en croix DN 16 KF		1			
378 776	Vanne de dosage DN 16 KF		1			
378 510	Manomètre à tube-ressort DN 16 KF		1			
311 78	Mètre ruban 2 m		1			
559 521	Feuille d'or et d'aluminium dans support			1		
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1	1	1	1

* complément recommandé

Jusqu'en 1930 environ, l'énergie de rayonnements α était caractérisée par leur portée dans l'air. Par exemple, une particule α de 5,3 MeV (^{210}Po) a une portée de 3,84 cm. De nos jours, les spectres d'énergie α peuvent être étudiés avec plus de précision grâce à des détecteurs semi-conducteurs. On trouve des raies discrètes qui correspondent à des niveaux d'excitation discrets des noyaux atomiques émetteurs.

Le relevé et la comparaison des spectres d'énergie α des deux préparations radioactives standard de ^{241}Am et de ^{226}Ra font l'objet de l'expérience P6.5.4.1. On effectue les mesures dans une chambre à vide afin d'améliorer la précision des mesures.

Au cours de l'expérience P6.5.4.2, on mesure l'énergie E de particules α en fonction de la pression p de l'air dans la chambre à vide. On obtient à partir des données mesurées la perte énergétique des particules α pour une distance dE/dx dans l'air. On a ainsi la distance apparente entre la préparation radioactive et le détecteur

$$x = \frac{p}{p_0} \cdot x_0$$

x_0 : Écartement réel

p_0 : pression normale

Dans l'expérience P6.5.4.3, on détermine pour la distance donnée la perte énergétique de particules α dans de l'or ou dans de l'aluminium, comme quotient entre la variation d'énergie ΔE et l'épaisseur Δx des feuilles de métal.

Durant l'expérience P6.5.4.4, on analyse les diverses contributions de la chaîne de désintégration du Ra-226 au spectre d'énergie α , pour déterminer l'âge de la préparation radioactive de Ra-226 utilisée. On obtient l'âge T de l'échantillon d'après la relation

$$A_2 = A_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}}\right)$$

$\tau = 32,2 \text{ a}$: durée de vie du ^{210}Pb

avec les activités A_1 et A_2 de la chaîne de désintégration „devant” et „derrière” l'isotope ^{210}Pb à durée de vie assez longue.

La fine structure du spectre α de l'américium 241 fait l'objet de l'expérience P6.5.4.5. La désintégration peut aboutir à différents états excités du noyau fille et montre ainsi les niveaux d'excitation du noyau. Pour ce faire, on utilise ici une source radioactive non scellée.

SPECTROSCOPIE γ

P6.5.5.1
Mise en évidence du rayonnement γ avec un compteur à scintillations

P6.5.5.2
Enregistrement et calibrage d'un spectre γ

P6.5.5.3
Absorption du rayonnement γ

P6.5.5.4
Identification et détermination de l'activité sur des échantillons faiblement radioactifs

P6.5.5.5
Enregistrement d'un spectre β avec un compteur à scintillations

P6.5.5.6
Coïncidence et corrélation angulaire γ - γ lors de la désintégration de positrons

P6.5.5.7
Coïncidence de désintégration γ de cobalt



Absorption du rayonnement γ (P6.5.5.3)

N° de cat.	Désignation	P6.5.5.1	P6.5.5.2	P6.5.5.3	P6.5.5.4	P6.5.5.5	P6.5.5.6	P6.5.5.7
559 845	Mélange de radionucléides α , β , γ	1					1	
559 901	Compteur à scintillation	1	1	1	1	1	2	2
559 891	Socle pour le compteur à scintillation	1	1	1	1	1	1	1
559 912	Module de sortie du détecteur	1	1	1	1	1	2	2
521 68	Alimentation haute tension 1,5 kV	1	1	1	1	1	2	2
524 013	Sensor-CASSY 2	1	1	1	1	1	1	1
524 058	Adaptateur AMC	1	1	1	1	1	2	2
524 220	CASSY Lab 2	1	1	1	1	1	1	1
300 42	Tige 47 cm, 12 mm \varnothing	1	1	1		1	1	1
301 01	Noix Leybold	1	1	1		1	1	1
666 555	Pince de serrage universelle 0...80 mm	1	1	1		1	1	1
575 302	Oscilloscope 30 MHz, numérique, PT1265	1*						
501 02	Câble HF, 1 m	1*						
559 835	Préparations, jeu de 3		1	1		1		
559 865	Préparation de sodium 22, 74 kBq		1				1	
559 855	Préparation de cobalt 60, 74 kBq		1*	1*				1
559 94	Jeu d'absorbants et de cibles			1		1		
559 89	Blindage du scintillateur				1	1		
559 88	Bécher de Marinelli				2			
559 885	Préparation d'étalonnage de césium 137, 5 kBq				1			
672 5210	Chlorure de potassium, 250 g				4			
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1	1	1	1	1	1

* complément recommandé

Les représentations de spectres γ prises à l'aide du compteur à scintillations permettent une identification de différents nucléides et donnent des informations fondamentales sur la physique nucléaire et les interactions du rayonnement γ avec la matière, à l'exemple de la diffusion Compton ou de l'effet photo-électrique.

Durant l'expérience P6.5.5.1, on étudie les impulsions de sortie du compteur à scintillation avec l'oscilloscope et l'adaptateur AMC CASSY. On identifie le pic d'absorption général et la diffusion Compton dans la répartition des hauteurs d'impulsions produite par rayonnement γ monoénergétique.

Le relevé et la comparaison de spectres d'énergie γ de préparations radioactives standard font l'objet de l'expérience P6.5.5.2. Les pics d'absorption totale servent à calibrer l'énergie du compteur à scintillations ainsi qu'à identifier les préparations radioactives.

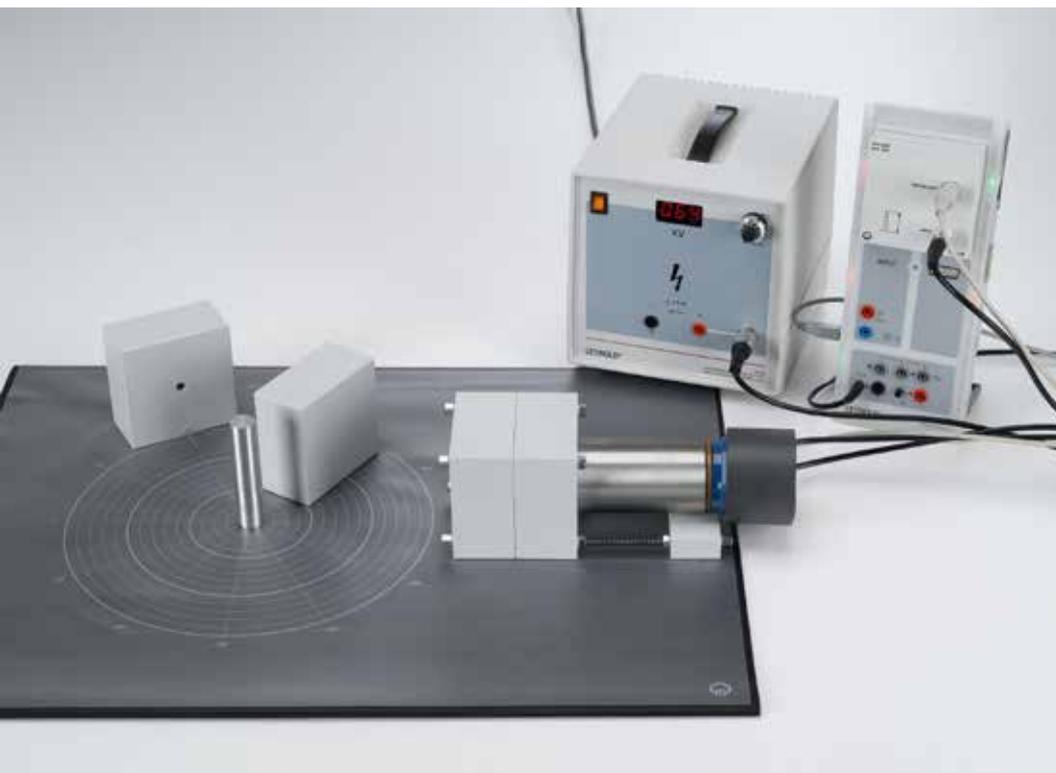
Dans l'expérience P6.5.5.3, on mesure l'atténuation d'un rayonnement γ dans différents absorbants. L'objet de l'étude est l'influence du matériau d'absorption et de l'énergie γ sur le coefficient d'atténuation μ .

Au cours de l'expérience P6.5.5.4, on utilise un bécher de Marinelli pour mesurer des échantillons faiblement contaminés. Il enferme si possible complètement le cristal de scintillation et garantit une géométrie de mesure définie. Un blindage de plomb réduit considérablement l'environnement perturbateur du laboratoire.

Durant l'expérience P6.5.5.5, on relève à l'aide du compteur à scintillations le spectre continu d'un émetteur pur de rayonnement β ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$). Pour déterminer la perte énergétique dE/dx des particules β dans l'aluminium, on place des feuilles d'aluminium de différentes épaisseurs x dans la marche des rayons, entre la préparation radioactive et le compteur.

Dans l'expérience P6.5.5.6, on démontre la corrélation spatiale des deux quanta γ pour une désintégration du couple électron-positron. La conservation de l'impulsion exige l'émission des deux quanta dans un angle de 180° . La mesure sélective d'un spectre de coïncidence conduit à la suppression des raies non corrélées.

Dans l'expérience P6.5.5.7, la désintégration du Cobalt-60 est étudiée et à l'aide des mesures de coïncidence l'existence de la désintégration en cascade est démontrée.



EFFET COMPTON
P6.5.6.1
Observation quantitative de l'effet Compton

Observation quantitative de l'effet Compton (P6.5.6.1)

N° de cat.	Désignation	P6.5.6.1
559 800	Collection Diffusion Compton	1
559 809	Préparation de césium 137, 3,7 MBq	1
559 845	Mélange de radionucléides α , β , γ	1
559 901	Compteur à scintillation	1
559 912	Module de sortie du détecteur	1
521 68	Alimentation haute tension 1,5 kV	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 058	Adaptateur AMC	1
524 220	CASSY Lab 2	1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

Dans le cas de l'effet Compton, un photon transmet par choc élastique une partie de son énergie E_0 et de son impulsion

$$p_0 = \frac{E_0}{c}$$

c : vitesse de la lumière dans le vide

à un électron libre. Ici, le théorème valable est celui de la conservation de l'énergie et de l'impulsion, tout comme en mécanique lors de la collision binaire. Energie

$$E(\vartheta) = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m \cdot c^2} \cdot (1 - \cos \vartheta)}$$

m : masse au repos de l'Électron

et impulsion

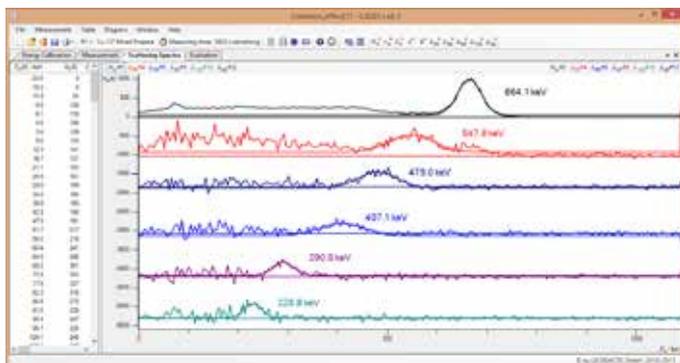
$$p = \frac{E}{c}$$

du photon diffusé dépendent de l'angle de diffusion ϑ . La section efficace dépendante de l'angle de diffusion est décrite par la formule de *Klein-Nishina* :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} \cdot r_0^2 \cdot \frac{p^2}{p_0^2} \cdot \left(\frac{p_0}{p} + \frac{p}{p_0} - \sin^2 \vartheta \right)$$

r_0 : $2,5 \cdot 10^{-15}$ m : rayon classique d'un Électron

Durant l'expérience P6.5.6.1, on étudie la diffusion Compton de quanta γ d'énergie $E_0 = 667$ keV sur les électrons quasiment libres d'un diffuseur en aluminium. Un compteur à scintillation calibré enregistre à chaque fois un spectre γ « avec » et « sans » diffuseur en aluminium, en fonction de l'angle de diffusion ϑ . L'exploitation ultérieure s'appuie sur le pic d'absorption totale du spectre de différence. On obtient l'énergie $E(\vartheta)$ d'après sa position. Son taux de comptage intégral $N(\vartheta)$ est comparé avec la section efficace calculée.



Déplacement de l'énergie de la raie du Cs-137 lorsqu'elle est diffusée dans différentes directions (P6.5.6.1).

CARACTÉRISTIQUES DES PARTICULES

P6.5.7.1
Déviation du rayonnement beta dans
un champ magnétique



Déviation du rayonnement beta dans un champ magnétique (P6.5.7.1)

N° de cat.	Désignation	P6.5.7.1
559 835	Préparations, jeu de 3	1
559 01	Tube compteur à fenêtre pour rayonnements α , β , γ et X avec câble	1
575 471	Compteur S	1
LDS 00001	Chronomètre manuel, numérique	1
521 391	Alimentation CA/CC 0...24 V/5 A	1
562 11	Noyau en U avec joug	1
562 13	Bobine à 250 spires	2
560 31	Pièces polaires perforées, paire	1
559 23	Support orientable pour tube compteur à fenêtre	1
559 18	Collimateur avec pastilles d'absorption	1
300 11	Socle	1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm \varnothing	1
301 01	Noix Leybold	1
501 25	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, rouge	1
501 26	Câble d'expérimentation 32 A, 50 cm, bleu	2
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1*
524 0381	Sonde B combinée S	1*
501 11	Câble rallonge, à 15 pôles	1*

* complément recommandé

D'un point de vue historique, l'existence de plusieurs types de rayons a vite été constatée mais l'identification des particules a par contre mis un certain temps. Le comportement dans un champ magnétique était et est encore une des méthodes très précieuses de caractérisation des particules électrisées.

L'expérience P6.5.7.1 consiste à dévier le rayonnement β dans un champ magnétique variable et à relever la distribution angulaire ainsi résultante. L'énergie du rayonnement peut ensuite être déterminée à partir de ces données.

OPTIQUE QUANTIQUE

P6.6.1.1
Effaceur quantique



Effaceur quantique (P6.6.1.1)

N° de cat.	Désignation	P6.6.1.1
473 40	Plaque de base pour optique laser	1
471 830	Laser He-Ne à polarisation linéaire	1
473 411	Porte-laser	1
473 421	Pied pour optique	9
473 431	Porte-lame séparatrice	2
473 432	Lame séparatrice 50 %	2
473 461	Miroir plan à réglage précis	2
473 471	Lentille sphérique $f = 2,7 \text{ m}$	2
473 49	Filtre polarisant pour plaque de base pour optique laser	3
441 53	Écran, translucide	2
300 11	Socle	2
311 02	Règle métallique, 1 m	1

L'optique quantique est un domaine d'étude de la physique qui décrit à l'aide de l'optique quantique mécanique la lumière ainsi que son interaction avec la matière.

Le principe de complémentarité constitue le principal sujet de la physique quantique: Chaque objet de la physique quantique a des propriétés ondulatoires et de particules. Dans l'expérience P6.6.1.1, un essai d'analogie à la effaceur quantique est monté afin de montrer la complémentarité de l'information „which way" et l'interférence.

PARTICULES

P6.6.2.1
Mise en évidence du muons



Mise en évidence du muons (P6.6.2.1)

N° de cat.	Désignation	P6.6.2.1
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 220	CASSY Lab 2	1
524 033	Adaptateur GM	2
559 012	Tube compteur à grande surface sensible	2
300 11	Socle	1*
587 07	Haut-parleur d'aigus	1*
501 45	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, rouge/bleu, paire	1*
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

* complément recommandé

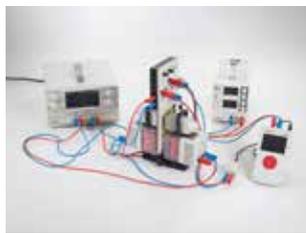
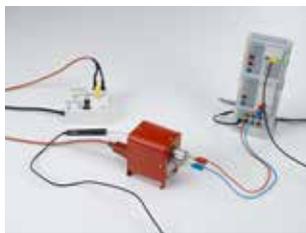
Les particules très énergétiques présentes sur la Terre ne proviennent pas seulement des désintégrations radioactives, elles peuvent aussi se trouver dans le rayonnement cosmique.

Dans l'expérience P6.6.2.1, on utilise la coïncidence temporelle entre deux détecteurs GM pour mettre les muons naturels en évidence. Les propriétés spécifiques des muons peuvent être représentées et l'enregistrement du flux de muons dans différentes directions ou tout au long d'une journée montre que leur origine est lié au soleil.



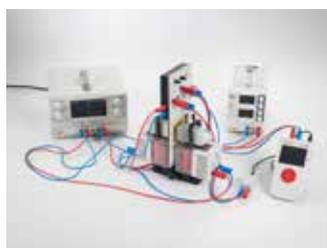
Distribution du taux de comptage pour le détecteur de muons orienté dans différentes directions (P6.6.2.1).

P7 PHYSIQUE DES SOLIDES



P7.1	PROPRIÉTÉS CRISTALLINES	233
P7.2	PHÉNOMÈNES DE CONDUCTION	236
P7.3	MAGNÉTISME	243
P7.5	PHYSIQUE APPLIQUÉE DES CORPS SOLIDES	245

P7 PHYSIQUE DES SOLIDES



P7.1 PROPRIÉTÉS CRISTALLINES

- P7.1.2 Analyse de structure par des rayons X 233-234
- P7.1.4 Déformations élastiques et plastiques 235

P7.2 PHÉNOMÈNES DE CONDUCTION

- P7.2.1 Effet Hall 236-237
- P7.2.2 Conduction électrique dans les solides 238
- P7.2.3 Photoconduction 239
- P7.2.4 Luminescence 240
- P7.2.5 Thermoélectricité 241
- P7.2.6 Supraconduction 242

P7.3 MAGNÉTISME

- P7.3.1 Diamagnétisme, paramagnétisme et ferromagnétisme 243
- P7.3.2 Hystérésis ferromagnétique 244

P7.5 PHYSIQUE APPLIQUÉE DES CORPS SOLIDES

- P7.5.1 Analyse par fluorescence X 245



ANALYSE DE STRUCTURE PAR DES RAYONS X

P7.1.2.1

Réflexion de Bragg: détermination de la constante de réseau d'un monocristal

P7.1.2.2

Cliché de Laue : étude de la structure réticulaire d'un monocristal

P7.1.2.3

Diagramme de Debye-Scherrer: détermination de l'écartement des plans réticulaires d'échantillons poudreux polycristallins

P7.1.2.4

Balayage de Debye-Scherrer : détermination de l'écartement des plans réticulaires d'échantillons de poudre polycristallins

Cliché de Laue : étude de la structure réticulaire d'un monocristal (P7.1.2.2)

N° de cat.	Désignation	P7.1.2.1	P7.1.2.2	P7.1.2.3	P7.1.2.4
554 800	Appareil de base à rayons X	1	1	1	1
554 861	Tube à rayons X, Mo	1	1	1	
554 831	Goniomètre	1			1
559 01	Tube compteur à fenêtre pour rayonnements α , β , γ et X avec câble	1			1
554 77	Cristal de LiF pour la réflexion de Bragg	1			
554 78	Cristal de NaCl pour la réflexion de Bragg	1			
554 838	Porte-film X-ray		1	1	
554 895	Film pour rayons X		1	1	
554 87	Cristal de LiF pour cliché de Laue		1		
554 88	Cristal de NaCl pour cliché de Laue		1		
667 091	Pilon 88 mm			1	1
667 092	Mortier en porcelaine 70 mm \varnothing			1	1
666 960	Microcuillère à poudre, 150 mm			1	1
311 54	Pied à coulisse de précision			1	
673 5700	Chlorure de sodium 250 g			1	1
673 0520	Fluorure de lithium, p.a., 10 g			1	1
554 862	Tube à rayons X, Cu				1
554 842	Support pour poudre cristalline				1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1			1

Le rayon X est un instrument irremplaçable dans la détermination de la structure cristalline. Chaque niveau cristallin est décrit à l'aide des indices de Miller h, k, l et renvoie le rayonnement X si les conditions de Laue ou de Bragg sont remplies. La répartition des réflexions donne des informations quantitatives sur la structure cristalline et les constantes cristallines des matières étudiées.

Dans l'expérience P7.1.2.1, on utilise la réflexion de Bragg d'un rayonnement K_{α} du molybdène ($\lambda = 71,080 \text{ pm}$) sur des monocristaux de NaCl et de LiF pour déterminer la constante du réseau. La composante K_{β} du rayonnement X peut être supprimée à l'aide d'un filtre de zirconium.

Dans l'expérience P7.1.2.2, le rayonnement de freinage du tube à rayons X joue le rôle de rayonnement X «blanc» afin de réaliser un cliché de *Laue* des monocristaux de NaCl et de LiF. La structure cristalline et la longueur des axes du cristal se déterminent à partir de la position des reflets «colorés» sur un film pour rayons X placé derrière le cristal et à partir de leur intensité en utilisant les conditions de *Laue*.

Dans l'expérience P7.1.2.3, des échantillons de fine poudre de cristal micro granulaire sont irradiés avec le rayonnement K_{α} du molybdène afin d'obtenir un film photographique avec la méthode de *Debye-Scherrer*. Parmi les nombreux cristallites désordonnés, il y a toujours des rayonnements X qui présentent une orientation conforme à la condition de *Bragg*. Les rayons diffractés décrivent les génératrices d'un cône dont l'angle d'ouverture ϑ peut être obtenu à partir d'un enregistrement photographique. On détermine l'écartement réticulaire correspondant à l'angle ϑ , les indices de *Laue* h, k, l du cristal ainsi que la structure réticulaire des cristallites.

Analogiquement à l'expérience P7.1.2.4, l'expérience P7.1.2.3 utilise pour la représentation des maximums de l'intensité un tube compteur Geiger-Müller au lieu d'un film pour rayon X. L'intensité, fonction du double angle d'incidence 2ϑ , est mesurée à l'aide d'un rayonnement du rayon X diffracté sur un échantillon de poudre de cristal. On peut déterminer les écartements réticulaires à partir des maxima d'intensité du spectre de diffraction.

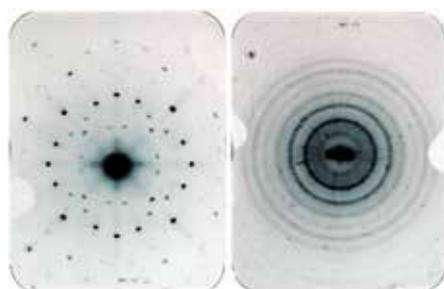


Diagramme de Laue de NaCl et photographie de Debye-scherrer de NaCl (P7.1.2.2 + P7.1.2.3).

ANALYSE DE STRUCTURE
PAR DES RAYONS X

P7.1.2.5

Cliché de Laue numérique : étude de la structure réticulaire de monocristaux

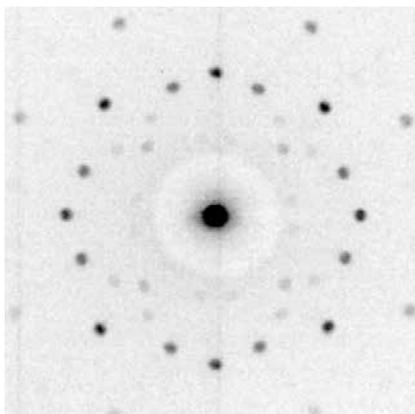
P7.1.2.6

Cliché de Debye-Scherrer numérique: détermination de l'écartement des plans réticulaires d'échantillons poudreux polycristallins



Cliché de Laue numérique : étude de la structure réticulaire de monocristaux (P7.1.2.5)

N° de cat.	Désignation	P7.1.2.5	P7.1.2.6
554 800	Appareil de base à rayons X	1	1
554 866	Tube à rayons X, Au	1	
554 8281	Capteur pour radiographie	1	1
554 8282	Bouclier pour capteur pour radiographie	1	1
554 8291	Chariot de positionnement de précision du capteur pour radiographie	1	1
554 8383	Collimateur à ouverture avec cristaux de Laue	1	1
554 861	Tube à rayons X, Mo		1
667 091	Pilon 88 mm		1
667 092	Mortier en porcelaine 70 mm Ø		1
666 960	Microcuillère à poudre, 150 mm		1
673 5700	Chlorure de sodium 250 g		1
673 0520	Fluorure de lithium, p.a., 10 g		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	



Taches de Laue pour le NaCl et image obtenue pour le NaCl avec la méthode de Debye-Scherrer (P7.1.2)

Le rayon X est un instrument irremplaçable dans la détermination de la structure cristalline. Chaque niveau cristallin est décrit à l'aide des indices de Miller h, k, l et renvoie le rayonnement X si les conditions de Laue ou de Bragg sont remplies. La répartition des réflexions donne des informations quantitatives sur la structure cristalline et les constantes cristallines des matières étudiées.

Dans l'expérience P7.1.2.5, le rayonnement de freinage du tube à rayons X joue le rôle de rayonnement X « blanc » afin de réaliser un cliché de *Laue* des monocristaux de NaCl et de LiF. La structure cristalline et la longueur des axes du cristal se déterminent à partir de la position des reflets « colorés » sur un capteur pour rayons X placé derrière le cristal et à partir de leur intensité en utilisant les conditions de *Laue*.

Dans l'expérience P7.1.2.6, des échantillons de fine poudre de cristal micro granulaire sont irradiés avec le rayonnement K_{α} du molybdène pour obtenir un enregistrement par la méthode de *Debye-Scherrer*. Parmi les nombreux cristallites désordonnés, il y a toujours des rayonnements X qui présentent une orientation conforme à la condition de *Bragg*. Les rayons diffractés décrivent les génératrices d'un cône dont l'angle d'ouverture ϑ peut être obtenu à partir d'un enregistrement photographique. On détermine l'écartement réticulaire correspondant à l'angle ϑ , les indices de *Laue* h, k, l du cristal ainsi que la structure réticulaire des cristallites.

Le capteur d'images à rayons X sensible permet la réalisation du cliché de *Debye-Scherrer* en seulement une minute et la mesure numérique du diamètre du cercle et de l'intégrale du cercle sur un PC, si l'échantillon de poudre a été soigneusement préparé et les rayons diffractés ont une intensité correspondante.

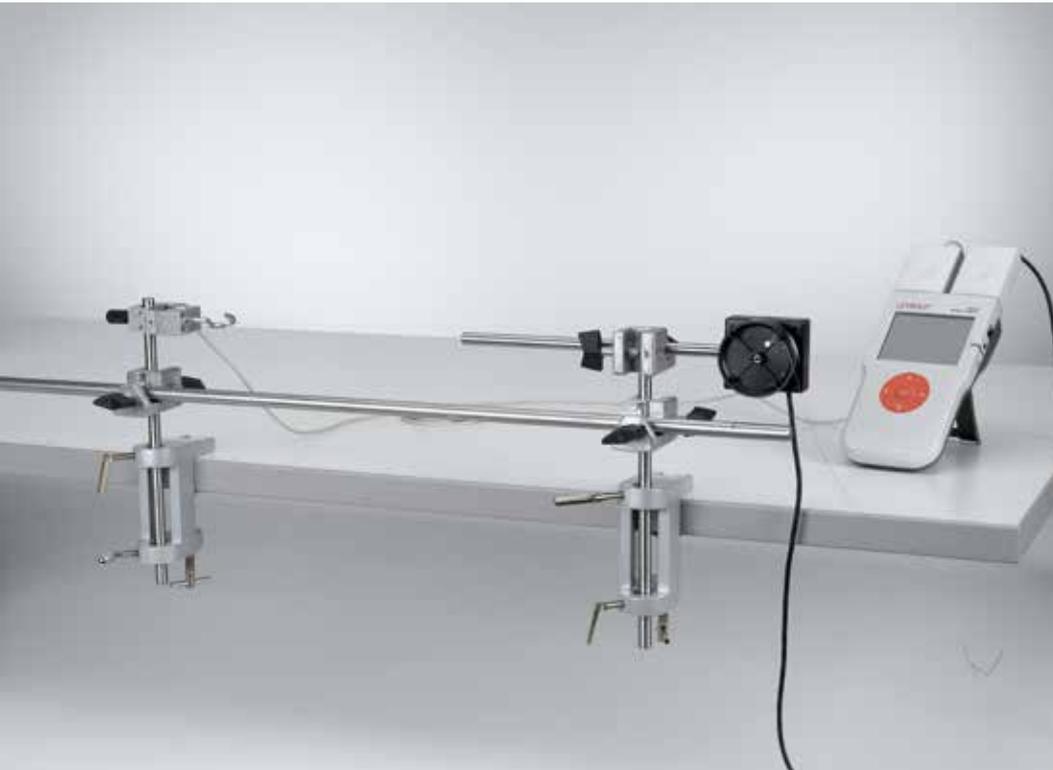
DÉFORMATIONS
ÉLASTIQUES ET PLASTIQUES

P7.1.4.1

Etude des élongations plastiques et élastiques de fils métalliques

P7.1.4.2

Etude des élongations plastiques et élastiques de fils métalliques - tracé et évaluation avec CASSY



Etude des élongations plastiques et élastiques de fils métalliques (P7.1.4.1)

N° de cat.	Désignation	P7.1.4.1	P7.1.4.2
550 35	Fil résistif (cuivre), 0,2 mm Ø, 100 m	1	1
550 51	Fil résistif (fer), 0,2 mm Ø, 100 m	1	1
342 63	Masses marquées de 50 g	18	
340 911	Poulie de 50 mm Ø, enfichable	1	
381 331	Indicateur pour dilatation linéaire	1	
340 82	Échelle double	1	
314 04	Crochet de suspension, enfichable	2	
301 07	Pince de table simple	2	2
301 01	Noix Leybold	4	3
301 25	Bloc de noix	3	
301 26	Tige 25 cm, 10 mm Ø	3	2
301 27	Tige 50 cm, 10 mm Ø	1	
300 44	Tige 100 cm, 12 mm Ø	1	1
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN		1
524 042	Capteur de forces S, ±50 N		1
524 082	Capteur de rotation S		1
311 78	Mètre ruban 2 m		1

Un solide cristallin change de forme sous l'influence de forces. On parle d'élasticité lorsqu'il reprend sa forme initiale, après que les forces cessent d'agir. Lorsque les forces dépassent la limite d'élasticité, le corps conserve une déformation permanente. Ce comportement élastique est dû à la migration des dislocations dans la structure cristalline.

Dans les expériences P7.1.4.1 et P7.1.4.2, on étudie l'allongement d'un fil de fer et d'un fil de cuivre en y accrochant des masses. Un index de précision où le capteur de rotation S au CASSY mesure le changement de longueur Δs ou allongement.

$$\epsilon = \frac{\Delta s}{s}$$

s : longueur du fil

Après chaque nouvelle charge avec un effort de traction

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

F : poids des masses marquées

A : section du fil

on vérifie si l'index ou le capteur de rotation revient à la position zéro en l'absence de charge, c.-à-d. si l'effort se situe en dessous de la limite d'élasticité σ_E . La représentation des valeurs mesurées dans un diagramme effort-déformation confirme la validité de la loi de Hooke

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

E : module d'élasticité

jusqu'à une certaine limite de proportionnalité σ_p .

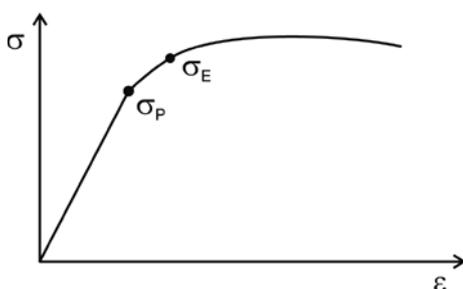


Diagramme effort-déformation d'un fil métallique typique (P7.1.4.1)

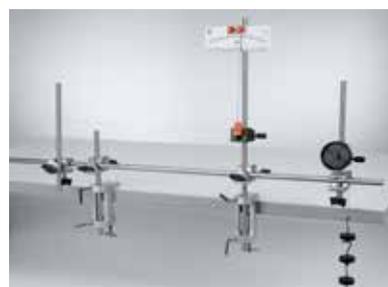


Diagramme effort-déformation d'un fil métallique typique (P7.1.4.1)

EFFET HALL

P7.2.1.1
Etude de l'effet Hall sur l'argent

P7.2.1.2
Etude de l'effet Hall anormal sur le tungstène



Etude de l'effet Hall sur l'argent (P7.2.1.1)

N° de cat.	Désignation	P7.2.1.1	P7.2.1.2
586 81	Appareil pour l'étude de l'effet Hall (argent)	1	
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1	1
524 0381	Sonde B combinée S	1	1
501 11	Câble rallonge, à 15 pôles	1	1
524 0401	Capteur de μV S	1	1
521 551	Alimentation CA/CC 0...24 V/0...10 A	1	1
726 890	Alimentation CC à courant fort 1...32 V/0...20 A	1	1
562 11	Noyau en U avec joug	1	1
560 31	Pièces polaires perforées, paire	1	1
562 13	Bobine à 250 spires	2	2
300 41	Tige 25 cm, 12 mm \varnothing	1	1
301 01	Noix Leybold	1	1
300 02	Pied en V, petit	1	1
500 442	Câble de connexion 19 A, 100 cm, bleu	1	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	2	2
501 33	Câble d'expérimentation 32 A, 100 cm, noir	2	2
586 84	Appareil pour l'étude de l'effet Hall (tungstène)		1

Dans les conducteurs ou semi conducteurs électriques situés dans un champ magnétique B et parcourus par un courant I , perpendiculaire à B , une tension électrique se crée par effet Hall.

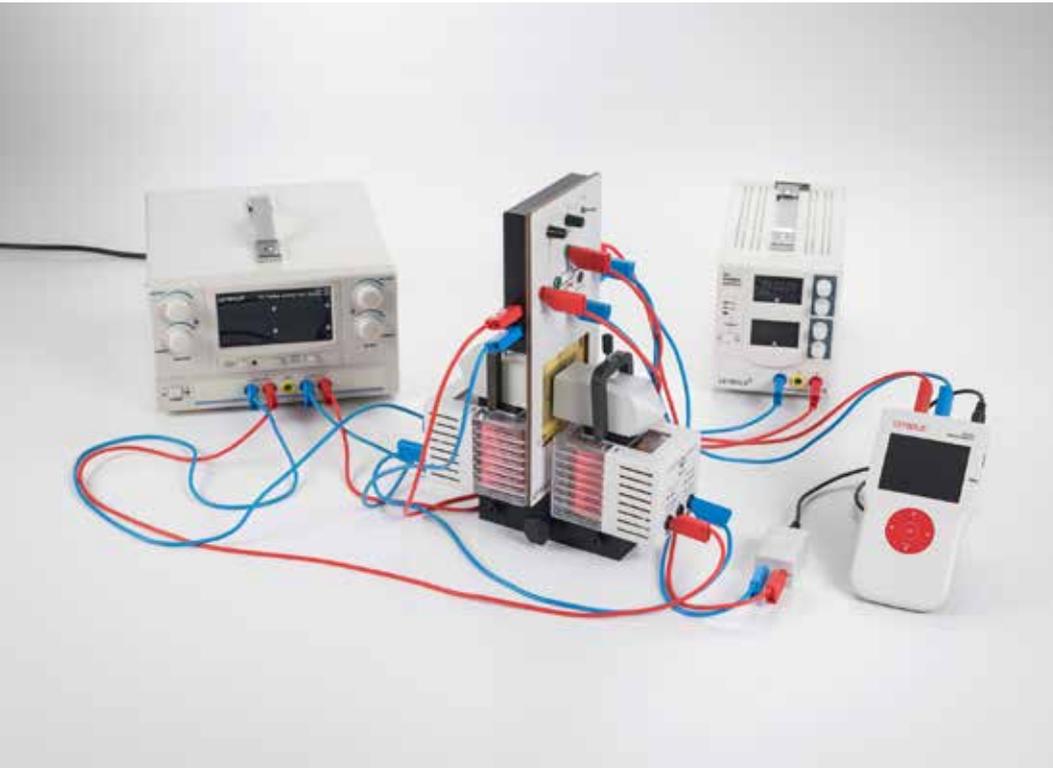
$$U_H = R_H \cdot B \cdot I \cdot \frac{1}{d} \quad d : \text{Épaisseur de l'Échantillon}$$

La constante de Hall

$$R_H = \frac{1}{e} \cdot \frac{p \cdot \mu_p^2 - n \cdot \mu_n^2}{(p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n)^2} \quad e : \text{charge Élémentaire}$$

dépend des concentrations n et p des électrons et des trous ainsi que de leur mobilité respective μ_n et μ_p et elle est donc subordonnée au matériau et à la température.

Dans les expériences P7.2.1.1 et P7.2.1.2, on détermine la constante de Hall R_H de deux conducteurs électriques par la mesure de la tension de Hall U_H en fonction du champ magnétique B pour divers courants I . On obtient une valeur négative pour la constante de Hall de l'argent. Ce résultat traduit le fait que le transport de charges s'effectue par des électrons. Par contre, on obtient une valeur positive pour la constante de Hall du tungstène, ce qui nous montre que ce sont essentiellement des trous qui interviennent dans la conduction de ce métal.



EFFET HALL

P7.2.1.3

Détermination de la densité de porteurs de charge et de la mobilité dans le germanium dopé n

P7.2.1.4

Détermination de la densité de porteurs de charge et de la mobilité dans le germanium dopé p

P7.2.1.5

Détermination de l'intervalle d'énergétique entre les deux bandes du germanium

Détermination de la densité de porteurs de charge et de la mobilité dans le germanium dopé p (P7.2.1.4)

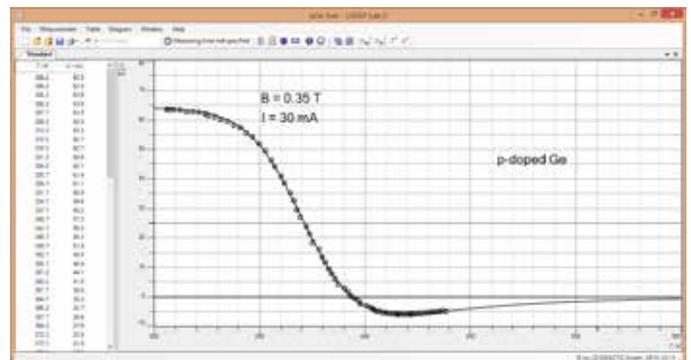
N° de cat.	Désignation	P7.2.1.3	P7.2.1.4	P7.2.1.5
586 850	Appareil de base pour l'étude de l'effet Hall	1	1	1
586 853	Ge dopé n sur carte imprimée	1		
562 11	Noyau en U avec joug	1	1	
562 13	Bobine à 250 spires	2	2	
560 31	Pièces polaires perforées, paire	1	1	
521 536	Alimentation CC 2 x 0...16 V/2 x 0...5 A	1	1	
521 546	Alimentation CC 0...16 V/0...5 A	1	1	2
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1	1	1
524 220	CASSY Lab 2	1	1	1
524 438	Capteur de tension M, ±30 V	1	1	1
524 0381	Sonde B combinée S	1	1	
501 11	Câble rallonge, à 15 pôles	1	1	
300 02	Pied en V, petit	1	1	1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	1	1	
301 01	Noix Leybold	1	1	
500 442	Câble de connexion 19 A, 100 cm, bleu	1	1	
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	6	6	4
586 852	Ge dopé p sur carte imprimée		1	
586 851	GE non dopé sur carte imprimée			1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1	1

Dans les expériences P7.2.1.3 et P7.2.1.4, on étudie la tension de Hall et la conductivité électrique en fonction de la température

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

sur des échantillons au germanium dopés. On détermine les concentrations des porteurs de charges et leur mobilité en supposant que, selon le type de dopage, l'une des concentrations n ou p peut être négligée.

Dans l'expérience P7.2.1.5, on mesure à titre de comparaison la conductivité électrique du germanium non dopé en fonction de la température. L'intervalle de bandes entre la bande de valence et la bande de conduction est déterminé à partir des données mesurées.

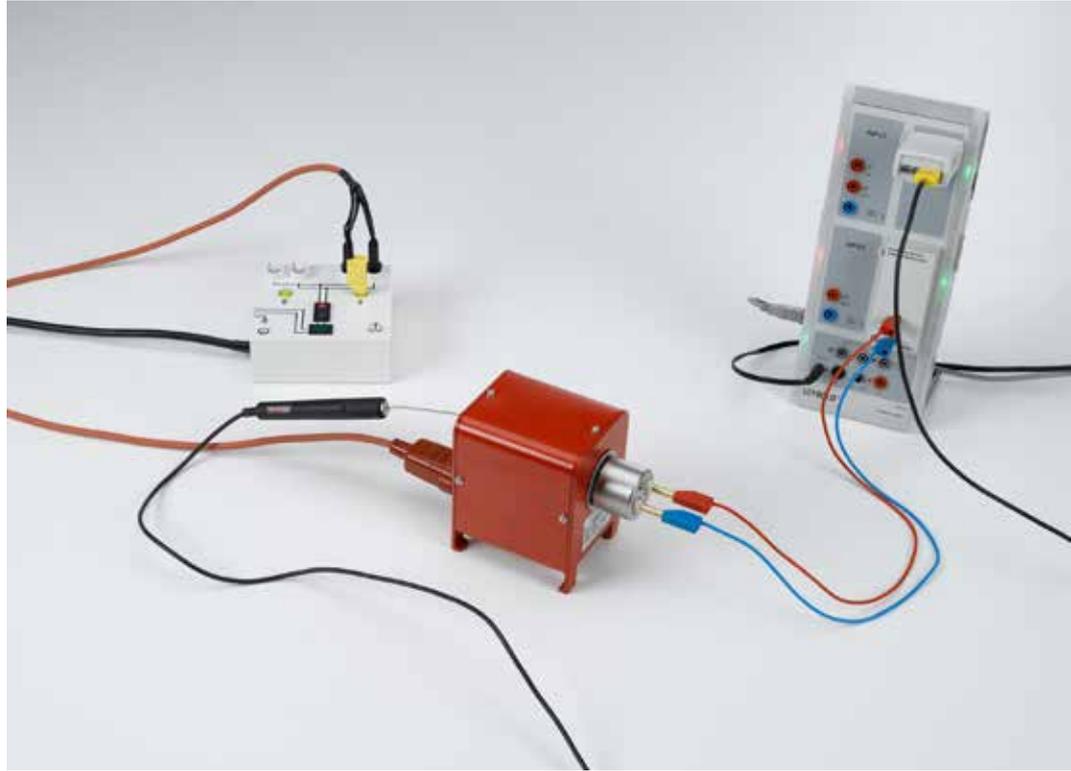


Tension de Hall lors du chauffage de l'échantillon de p-Ge (P7.2.1.4).

CONDUCTION ÉLECTRIQUE
DANS LES SOLIDES

P7.2.2.1
Étude de l'influence de la température sur la résistance d'un métal précieux

P7.2.2.2
Étude de l'influence de la température sur la résistance d'un semi conducteur



Étude de l'influence de la température sur la résistance d'un métal précieux (P7.2.2.1)

N° de cat.	Désignation	P7.2.2.1	P7.2.2.2
586 80	Résistance en métal précieux	1	
555 81	Four électrique tubulaire, 230 V	1	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1	1
524 220	CASSY Lab 2	1	1
524 0673	Connecteur adaptateur NiCr-Ni S, type K	1	1
529 676	Sonde de température NiCr-Ni, 1,5 mm, type K	1	1
524 031	Adaptateur source de courant	1	1
502 061	Boîte de jonction de sécurité avec mise à la terre	1	1
500 614	Câble de connexion de sécurité 25 cm, noir	1	1
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	1	1
500 622	Câble de connexion de sécurité 50 cm, bleu	1	1
586 821	Résistance à semi-conducteur 5 kΩ		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1

L'étude de la subordination à la température de la résistance spécifique ρ constitue un test simple pour la description théorique de la conductivité électrique des semi conducteurs et des conducteurs. Dans les conducteurs électriques, ρ croît avec la température étant donné que les collisions entre les électrons quasi-libres de la bande de conduction et les coeurs des atomes du conducteur jouent un rôle de plus en plus important. Par contre, dans les semi conducteurs la résistance spécifique diminue au fur et à mesure que la température augmente car de plus en plus d'électrons réussissent à se déplacer de la bande de valence vers la bande de conduction et participent ainsi à la conduction du courant.

Dans les expériences P7.2.2.1 et P7.2.2.2, on mesure la valeur de la résistance en fonction de la température dans un montage en pont de Wheatstone. On utilise l'interface CASSY pour enregistrer et afficher les courbes. Pour la résistance en métal précieux, on confirme la relation suivante avec une bonne précision dans le domaine de température étudié :

$$R = R_0 \cdot \frac{T}{\Theta}$$

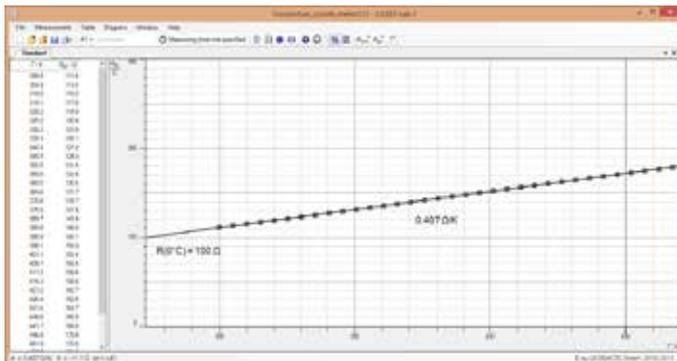
$$\Theta = 240 \text{ K} : \text{Température de Debye du platine}$$

Pour le semi-conducteur, l'exploitation donne une dépendance de la forme

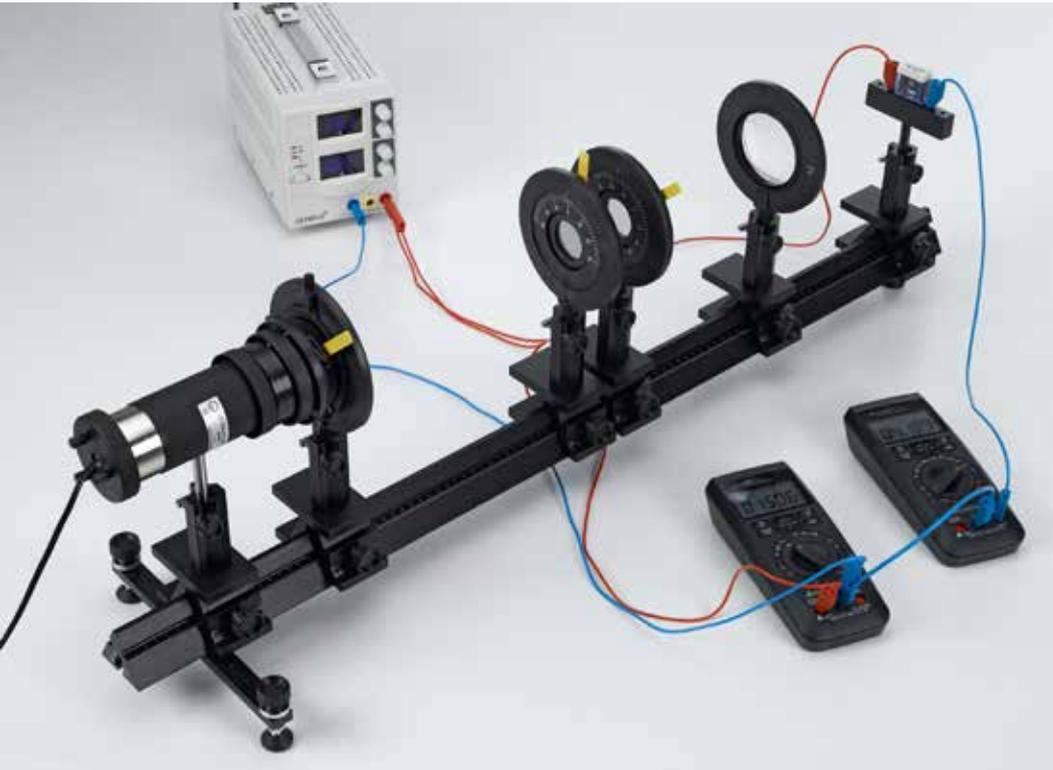
$$R \sim e^{\frac{\Delta E}{2kT}}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} : \text{constante de Boltzmann}$$

pour l'intervalle de bandes $\Delta E = 0,5 \text{ eV}$.



Resistance against temperature (P7.2.2.1)



PHOTOCONDUCTION

P7.2.3.1

Relevé des caractéristiques courant-tension d'une photorésistance au sulfure de cadmium

Relevé des caractéristiques courant-tension d'une photorésistance au sulfure de cadmium (P7.2.3.1)

N° de cat.	Désignation	P7.2.3.1
578 02	Photorésistance LDR 05, STE 2/19	1
450 511	Ampoules 6 V/ 30 W, E14, jeu de 2	1
450 60	Carter de lampe avec câble	1
460 20	Condenseur asphérique	1
460 14	Fente réglable	1
472 401	Filtre polarisant	2
460 08	Lentille dans monture, $f = +150$ mm	1
460 32	Banc d'optique à profil normalisé, 1 m	1
460 374	Cavalier 90/50 pour l'optique	6
460 21	Support pour éléments enfichables	1
521 546	Alimentation CC 0...16 V/0...5 A	1
521 210	Transformateur 6/12 V, 30 W	1
531 282	Multimètre Metrahit Pro	1
531 303	Multimètre Metrahit X-tra	1
500 422	Câble de connexion 19 A, 50 cm, bleu	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	2

On appelle photoconduction l'augmentation de la conductivité électrique σ dans un solide par absorption de lumière. Par exemple, dans du CdS, l'énergie absorbée permet le passage des électrons libres dans la bande de conduction et l'échange de charge de pièges avec formation de trous dans la bande de valence. Un courant photoélectrique I_{ph} circule à l'application d'une tension U .

Le but de l'expérience P7.2.3.1 est l'étude d'une part, de la relation entre le courant photoélectrique I_{ph} et la tension U pour une intensité de rayonnement Φ_e constante et, d'autre part, de la relation entre I_{ph} et Φ_e pour une tension U constante.

LUMINESCENCE

P7.2.4.1

Excitation de luminescence par exposition à de la lumière ultraviolette et à des électrons



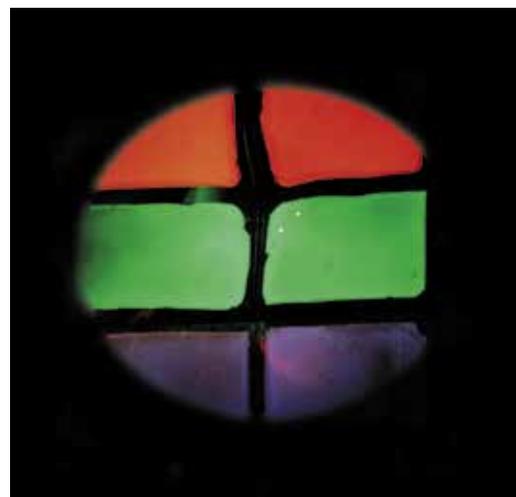
Excitation de luminescence par exposition à de la lumière ultraviolette et à des électrons (P7.2.4.1)

N° de cat.	Désignation	P7.2.4.1
555 618	Tube à luminescence	1
555 600	Support pour tubes	1
521 70	Alimentation haute tension 10 kV	1
451 15	Lampe haute pression au mercure, dans boîtier	1
451 195	Alimentation pour lampe haute pression au mercure	1
469 79	Filtre pour ultraviolet	1
500 611	Câble de connexion de sécurité, 25 cm, rouge	1
500 621	Câble de connexion de sécurité 50 cm, rouge	1
500 641	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, rouge	1
500 642	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, bleu	1
500 644	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, noir	2

La luminescence est l'émission de lumière après absorption préalable d'énergie. L'énergie peut, par exemple, être transportée par des électrons rapides ou bien par des photons dont l'énergie est supérieure à celle des photons émis. La fluorescence et la phosphorescence se distinguent suivant la façon dont l'émission de lumière diminue. La fluorescence correspond à la diminution exponentielle de l'émission de photons en très peu de temps à la fin de l'excitation (environ 10^{-8} seconde). Par contre cette baisse peut durer plusieurs heures pour la phosphorescence.

Dans l'expérience P7.2.4.1, on met en évidence la luminescence de divers solides après une exposition à la lumière ultraviolette ou bien à des électrons: il s'agit du vanadate d'yttrium dopé à l'eupreium (fluorescence rouge, temps de désintégration moyennement court), du sulfure de zinc dopé avec de l'argent (phosphorescence bleue, temps de désintégration moyen) ainsi que du sulfure de zinc dopé avec de l'argent et du cobalt (phosphorescence vert-jaune, temps de désintégration long). On montre également que le rayonnement infrarouge accélère la diminution de la phosphorescence.

N.B. : A l'aide d'un spectromètre, on peut reconnaître des raies d'émission individuelles à l'intérieur du spectre de bandes.



Exciter la luminescence par irradiation avec de la lumière ultraviolette et des électrons (P7.2.4.1).

THERMOÉLECTRICITÉ

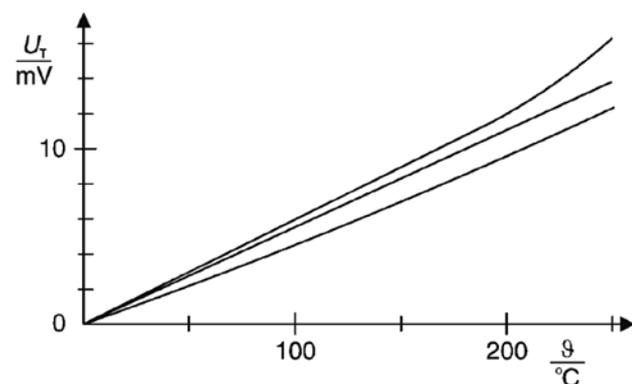
P7.2.5.1

Effet Seebeck: détermination de la tension thermoélectrique en fonction de la différence de température



Effet Seebeck : détermination de la tension thermoélectrique en fonction de la différence de température (P7.2.5.1)

N° de cat.	Désignation	P7.2.5.1
557 01	Thermocouples, jeu	1
590 011	Fiche de fixation	2
524 005W	Mobile-CASSY 2 WLAN	1
524 0401	Capteur de $\mu V S$	1
382 34	Thermomètre, -10...+110 °C/0,2 K	1
666 767	Plaque chauffante, 1500 W, 185 mm Ø	1
664 104	Bécher DURAN, 400 ml, forme basse	1



Tension thermoélectrique en fonction de la température en haut: chrome/nickel-constantan, au milieu: fer-constantan, en bas: cuivre-constantan (P7.2.5.1)

Lorsque deux fils métalliques se touchent avec des énergies de Fermi E_F différentes, les électrons passent de l'un à l'autre. Le métal avec le travail d'extraction W_A le plus faible cède des électrons et devient positif. Ce transfert d'électrons ne cesse que lorsque la tension de contact

$$U = \frac{W_{A,1} - W_{A,2}}{e}$$

e : charge Élémentaire

s'est établie. Si l'on assemble les fils électriques de façon à ce qu'ils se touchent aux extrémités et que les deux points de contact présentent une différence de température $T = T_1 - T_2$, alors une tension électrique, la tension thermoélectrique

$$U_T = U(T_1) - U(T_2)$$

est générée. La tension thermoélectrique différentielle

$$\alpha = \frac{dU_T}{dT}$$

dépend ici de la combinaison des deux métaux.

Dans l'expérience P7.2.5.1, on mesure la tension thermique U_T en fonction de la température T entre les deux points de contact avec les thermocouples fer-constantan, cuivre-constantan, chrome/nickel constantan. L'un des points de contact reste constant à température ambiante, l'autre est chauffé au bain-marie. Pour déterminer la tension thermoélectrique différentielle, on a recours à une régression linéaire de la forme

$$U_T = \alpha \cdot T$$

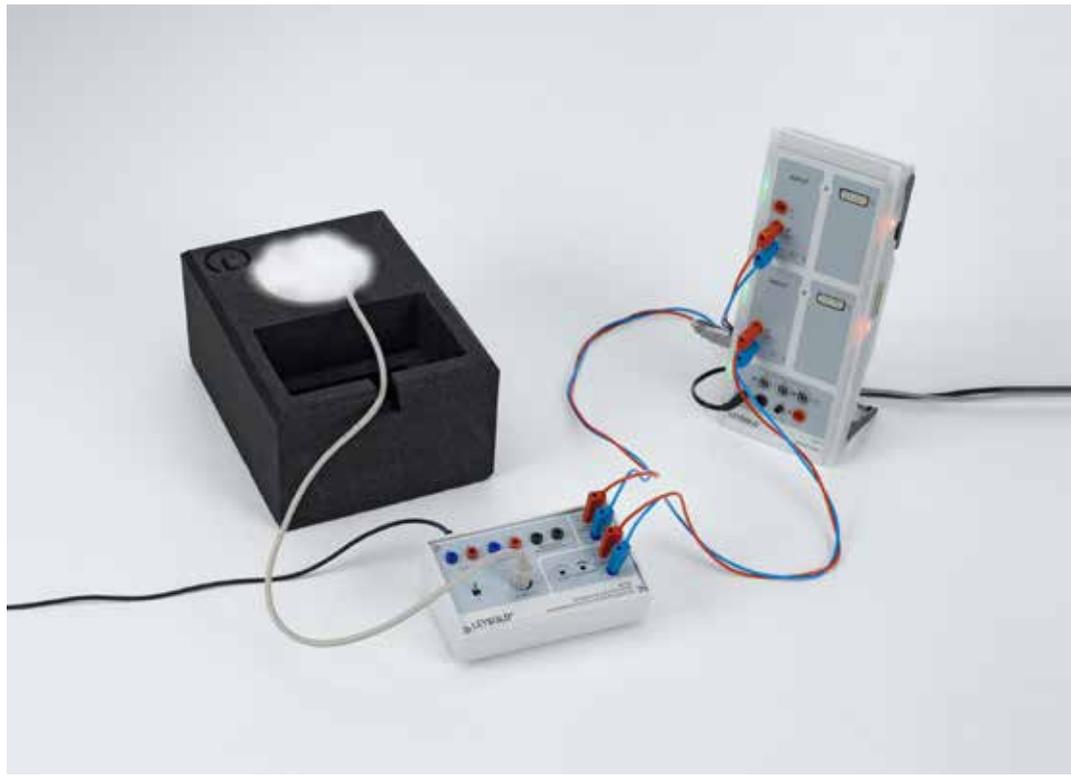
SUPRACONDUCTION

P7.2.6.1

Détermination de la température critique d'un supraconducteur à haute température

P7.2.6.2

Effet de Meissner-Ochsenfeld sur un supraconducteur à haute température



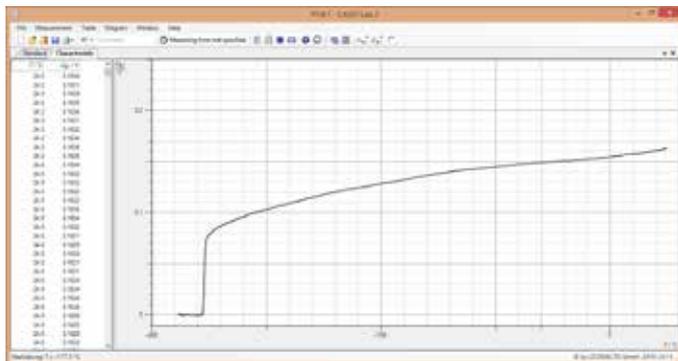
Détermination de la température critique d'un supraconducteur à haute température (P7.2.6.1)

N° de cat.	Désignation	P7.2.6.1	P7.2.6.2
667 553	Kit d'expérimentation, supraconducteur	1	
524 013	Sensor-CASSY 2	1	
524 220	CASSY Lab 2	1	
501 45	Câbles d'expérimentation 19 A, 50 cm, rouge/bleu, paire	2	
667 551	Effet Meissner-Ochsenfeld, kit d'expérimentation		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	

En 1986, *K. A Müller* et *J. G Bednorz* ont réussi à démontrer que le composé $YBa_2Cu_3O_7$ devient supraconducteur à une température critique bien supérieure aux valeurs connues jusqu'à présent. Depuis lors, on a découvert des supraconducteurs à haute température qu'il est possible de refroidir avec de l'azote liquide en dessous de la température critique. Comme tous les supraconducteurs, les supraconducteurs à haute température n'ont eux aussi pas de résistance électrique et mettent en évidence le phénomène connu sous le nom d'effet Meissner-Ochsenfeld se caractérisant par le refoulement de champs magnétiques hors de l'échantillon supraconducteur.

Dans l'expérience P7.2.6.1, on détermine la température critique du supraconducteur à haute température $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Pour cela, on refroidit la substance avec de l'azote liquide en dessous de sa température critique $T_c = 92$ K. Dans une mesure en 4 points, on trace la chute de tension à l'échantillon en fonction de sa température avec l'interface CASSY.

Dans l'expérience P7.2.6.2, on met en évidence la supraconductivité de $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ à l'aide de l'effet Meissner-Ochsenfeld. Un aimant (grande intensité du champ magnétique pour un poids minimal) placé tout d'abord sur l'échantillon, se met à flotter lorsque l'échantillon devient supraconducteur en refroidissant et lorsqu'il refoule le champ magnétique de l'aimant permanent.



Déterminer la température de transition d'un supraconducteur à haute température (P7.2.6.1).



Effet Meissner-Ochsenfeld pour un supraconducteur à haute température (P7.2.6.2).

**DIAMAGNÉTISME,
PARAMAGNÉTISME ET
FERROMAGNÉTISME**

P7.3.1.1

Substances diamagnétiques, paramagnétiques et ferromagnétiques dans un champ magnétique non homogène

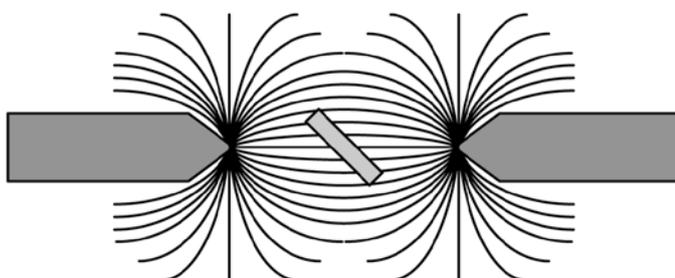


Substances diamagnétiques, paramagnétiques et ferromagnétiques dans un champ magnétique non homogène (P7.3.1.1)

N° de cat.	Désignation	P7.3.1.1
560 41	Diamagnétisme et ferromagnétisme, jeu de tiges	1
562 11	Noyau en U avec joug	1
562 13	Bobine à 250 spires	2
560 31	Pièces polaires perforées, paire	1
521 391	Alimentation CA/CC 0...24 V/5 A	1
300 02	Pied en V, petit	1
300 41	Tige 25 cm, 12 mm Ø	2
301 01	Noix Leybold	1
500 422	Câble de connexion 19 A, 50 cm, bleu	1
501 46	Câble de connexion 19 A, 100 cm, rouge/bleu, paire	1

On appelle diamagnétisme le fait que la magnétisation générée à l'intérieur d'une substance par un champ magnétique externe est en sens inverse, selon la loi de Lenz, du champ magnétique appliqué. C'est ainsi qu'une force agit sur des substances diamagnétiques dans un champ magnétique non homogène, en direction d'une intensité magnétique décroissante. Des substances paramagnétiques possèdent des moments magnétiques permanents qui sont alignés sous l'action d'un champ magnétique externe. Une aimantation se produit en direction du champ externe provoquant ainsi le déplacement des substances en direction d'une intensité de champ croissante. Les substances ferromagnétiques se caractérisent par une aimantation très élevée qui se situe à des ordres de grandeur supérieurs à ceux des substances paramagnétiques.

Dans l'expérience P7.3.1.1, on suspend trois tiges de 9 mm de long, de comportement magnétique différent et qu'il est facile de faire tourner, dans un champ magnétique fortement non-homogène de telle façon que ce champ les attire ou les repousse suivant leurs propriétés magnétiques.



Positionnement de l'échantillon dans le champs magnétique (P7.3.1.1).

HYSTÉRÉSIS
FERROMAGNÉTIQUE

P7.3.2.1
Tracé de la courbe de première aimantation et d'hystérésis d'une substance ferromagnétique et fer



Tracé de la courbe de première aimantation et d'hystérésis d'une substance ferromagnétique et fer (P7.3.2.1)

N° de cat.	Désignation	P7.3.2.1
562 11	Noyau en U avec joug	1
562 115	Noyau de fer en U avec joug	1
562 121	Agrafe d'assemblage avec pince à ressort	1
562 14	Bobine à 500 spires	2
522 621	Générateur de fonctions S 12	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1
524 220	CASSY Lab 2	1
577 20	Résistance 10 ohms, STE 2/19	1
576 81	Plaque à réseau prise de sécurité , 20/10	1
500 624	Câble de connexion de sécurité 50 cm, noir	1
500 644	Câble de connexion de sécurité, 100 cm, noir	7
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1

Dans un aimant ferromagnétique, l'induction magnétique

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} : \text{constante de champ magnétique}$$

atteint une valeur de saturation B_S pour une augmentation du champ magnétique H . La perméabilité relative μ_r de l'aimant ferromagnétique dépend de son prétraitement magnétique et de l'intensité du champ magnétique H . Il est donc d'usage de représenter l'induction magnétique B en fonction de l'intensité du champ H croissante puis décroissante dans un cycle d'hystérésis. Le cycle d'hystérésis diffère de ladite courbe d'aimantation initiale qui commence à l'origine du système de coordonnées et que l'on ne peut mesurer que pour un matériau complètement démagnétisé.

Dans l'expérience P7.3.2.1, un courant I_1 augmentant (ou diminuant) linéairement avec le temps, génère l'intensité de champ magnétique

$$H = \frac{N_1}{L} \cdot I_1$$

L : longueur effective du noyau de fer

N_1 : nombre de spires de la bobine primaire

dans la bobine primaire d'un transformateur.

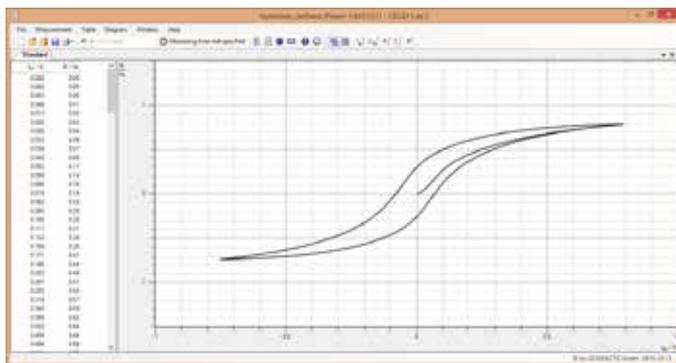
On obtient l'induction magnétique B correspondante en intégrant la tension U_2 qui est induite dans la bobine secondaire du transformateur.

$$B = \frac{1}{N_2 \cdot A} \cdot \int U_2 \cdot dt$$

A : section transversale du noyau de fer

N_2 : nombre de spires de la bobine secondaire

On utilise l'interface CASSY pour commander le courant et enregistrer les valeurs. On détermine la perméabilité relative μ_r sur la courbe d'aimantation initiale et sur le cycle d'hystérésis en fonction de l'intensité de champ magnétique H .



Flux magnétique dans le noyau de fer en fonction du courant de la bobine (P7.3.2.1).

**ANALYSE PAR
FLUORESCENCE X**

P7.5.1.1

Application du fluorescence X pour l'analyse sans destruction de la composition chimique

P7.5.1.2

Détermination de la composition chimique d'un échantillon en laiton au moyen de l'analyse par fluorescence X



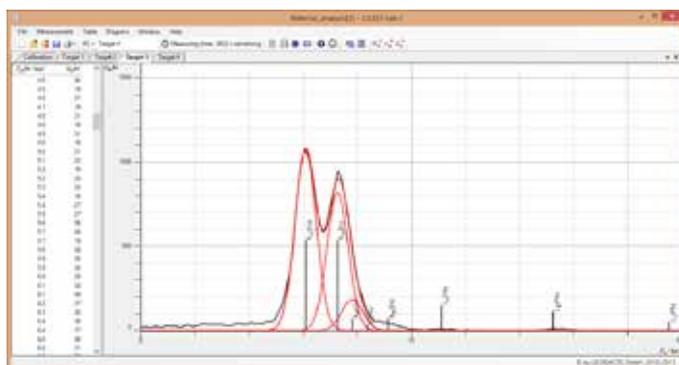
Application du fluorescence X pour l'analyse sans destruction de la composition chimique (P7.5.1.1)

N° de cat.	Désignation	P7.5.1.1	P7.5.1.2
554 800	Appareil de base à rayons X	1	1
554 861	Tube à rayons X, Mo	1	1
554 831	Goniomètre	1	1
559 938	Détecteur d'énergie de rayonnement X	1	1
554 848	Cibles en alliages, jeu	1	1
524 013	Sensor-CASSY 2	1	1
524 220	CASSY Lab 2	1	1
524 058	Adaptateur AMC	1	1
501 02	Câble HF, 1 m	1	1
554 844	Cibles fluorescence des raies K, jeu		1
554 846	Cibles fluorescence des raies L, jeu		1
	En complément : PC avec Windows XP/Vista/7/8/10 (x86 ou x64)	1	1

La fluorescence des rayons X est une méthode très utile pour une analyse non-destructrice d'un alliage. Sous un faisceau de rayons X, chaque élément émet une fluorescence de faisceau de rayons X caractéristique permettant son identification comme empreinte digitale.

Dans l'expérience P7.5.1.1, quatre alliages de laitons sont étudiés à l'aide de la fluorescence du faisceau du rayon X ainsi que sa composition qualitative. Les alliages sont: chrome-nickel-acier, 2 laitons et un aimant à terres rares.

Dans l'expérience P7.5.1.2, un alliage de laiton est quantitativement analysé. Les proportions de poids de chaque composant sont calculées à l'aide de la force de fluorescence du faisceau du rayon X.

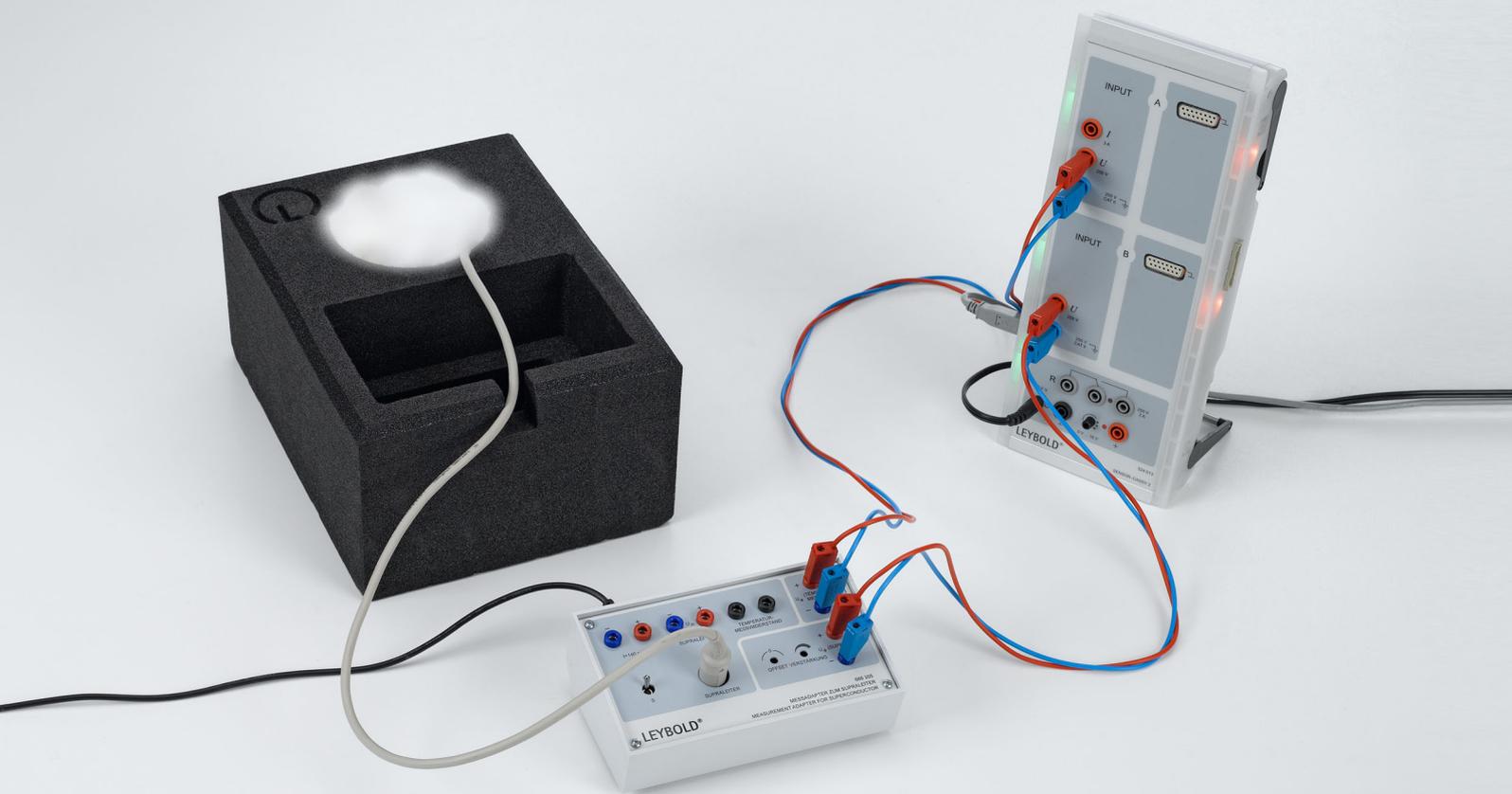


Spectre de fluorescence aux rayons X d'un échantillon de laiton (P7.5.1.2).

P7.2.6.1

Détermination de la température critique d'un supraconducteur à haute température

Pour plus d'informations sur cette expérience, rendez-vous à la page 242.



P8 REGISTRE



α, β, γ

α radiation	221
α spectrum.....	225
β radiation	221, 228
β spectrum.....	226
γ radiation	221
γ spectrum	226

3

3D	216-217
----------	---------

A

Aberration chromatique	167
Aberration de lentille.....	167
Aberration d'image	167
Aberration sphérique.....	167
Absorption de la lumière	172
Absorption de micro-ondes.....	137
Absorption de rayons X	228, 229
Absorption du rayonnement β	242
Absorption du rayonnement γ	237, 242
Absorption par résonance.....	223, 225
Accélération.....	17, 18
Amplificateur opérationnel.....	159, 160
Amplificateur opérationnel inverseur.....	160
Amplificateur opérationnel non inverseuse	160
Amplification de tension avec une triode en tube.....	141
Amplitude d'oscillation	36
Analogie optique	213
Analyse cristallographique aux rayons X	248
Analyse des sons	55
Analyse des voyelles.....	55
Anémomètre Laser-Doppler	204
Angle d'inclinaison	121
Anomalie de l'eau.....	69
Antenne.....	139
Appareil de résonance à colonne à gaz	81
Archimède, principe d'	58
Arête d'absorption	228, 229
Arête K	228, 229
Arête, diffraction par une	177
Astigmatisme.....	167
Atténuation de rayonnements α, β et γ	237
Atténuation de rayons X	228, 230
Autocollimation	166

B

Babinet, théorème de.....	153
Balance de gravitation de Cavendish	198-199
Balance de torsion	91
Balmer, série de.....	215, 216
Banc à coussin d'air.....	17-20
Battement	47, 53
Bernoulli, équation de.....	63
Bessel, méthode de.....	166
Biot et Savart, loi de	114
Biprisme	179
Biréfringence	187, 189, 190
Bobine	127
Bohr, magnéton de.....	224
Bohr, modèle atomique de -.....	220-222
Boyle-Mariotte, loi de.....	80
Bragg, réflexion de	229, 248
Braun, tube de.....	143
Breit-Rabi, formule de	225
Brewster, angle de.....	186

C

Capacité d'un condensateur à plaques.....	101, 102
Capacité d'une sphère.....	100
Capacité thermique	73
Capteur solaire.....	71
Caractéristique(s) d'un phototransistor.....	158
Caractéristique(s) d'un transistor.....	156
Caractéristique(s) d'un transistor à effet de champ.....	156
Caractéristique(s) d'un varistor	153
Caractéristique(s) d'une diode	140, 154
Caractéristique(s) d'une diode électroluminescente.....	154
Caractéristique(s) d'une diode en tube.....	140
Caractéristique(s) d'une diode Zener	154
Caractéristique(s) d'une lampe à incandescence.....	153
Caractéristique(s) d'une photorésistance	252
Caractéristique(s) d'une pile solaire	152
Caractéristique(s) d'une triode en tube.....	141
Cavendish, Hémisphère.....	99
Centre de gravité.....	25
Chaleur de condensation.....	76
Chaleur de fusion	76
Chaleur d'évaporation.....	76
Chaleur latente	76
Chaleur massique	73
Chambre à brouillard.....	238
Chambre d'ionisation	227
Champ électrique	94-98

Champ électrique d'une bobine.....	114	Constante d'allongement.....	7
Champ électrique homogène.....	97	Constante de gravitation.....	5
Champ géomagnétique.....	121	Constante de temps L/R.....	127
Champ magnétique de bobines de Helmholtz.....	114	Constante de temps RC.....	126
Charge électrique.....	89-93, 99, 140-144	Constante diélectrique.....	101, 102
Charge élémentaire.....	208	Constante diélectrique de l'eau.....	135
Charge image.....	98, 100	Conversion de courant avec transformateur.....	119
Charge quantification de la.....	208	Conversion de tension avec un transformateur.....	119
Charge spécifique de l'électron.....	144, 209, 224	Corps noir.....	193
Chariot pour rail.....	14-16	Corps rigide.....	25, 26
Choc.....	20, 21, 26	Couche lumineuse.....	146
Choc élastique.....	20, 21, 26	Couleurs complémentaires.....	170
Choc élastique entre deux corps en rotation.....	28	Couleurs primaires.....	171
Choc en rotation.....	28	Couleurs secondaires.....	171
Choc inélastique.....	20, 21, 26	Coulomb, loi de.....	91-93
Choc inélastique entre deux corps en rotation.....	28	Couplage de réaction.....	134
Choc inélastique entre électrons.....	220-222	Couplage d'oscillations.....	40, 41
Chute libre.....	22-24	Couples rédox.....	110
Circuit électrique oscillant.....	55	Couples voltaïques.....	110
Circuit oscillant.....	55, 128	Courant électrique pour le transport de charges.....	104
Circuit oscillant électronique.....	128	Courbe d'aimantation initiale.....	257
Circuits de générateur.....	157	Courbure de champ.....	167
Coefficient adiabatique.....	81	Cp,CV.....	81
Coefficient de dilatation.....	67, 68	CT.....	233
Coefficient de frottement.....	12	Cycle thermodynamique.....	82-86
Coefficient de traînée.....	62		
Coefficient d'efficacité.....	86		
Cohérence.....	178, 182		
Cohérence spatiale.....	178	D	
Cohérence temporelle.....	182	Daniell, pile de.....	110
Coïncidence.....	242	Datation radioactif.....	241
Coma.....	167	De Broglie, longueur d'onde de.....	213
Commande.....	161	Débit de dose ionique.....	227
Commande de feux de circulation.....	161	Debye, température de.....	251
Comparateur.....	160	Debye-Scherrer diagramme de.....	248
Composition d'alliage.....	259	Debye-Scherrer diffraction de.....	213
Compteur à courant alternatif.....	118	Décharge gazeuse.....	145, 146
Compteur à scintillations.....	242	Décharge gazeuse autonome.....	145, 146
Compteur Geiger.....	234	Décharge gazeuse semi-autonome.....	145
Condensateur.....	101-103, 126	Décomposition de la lumière blanche.....	170
Condensateur à plaques.....	101-103	Décomposition des forces.....	8
Conducteur électrique.....	99, 105-107, 251, 252	Dédoublément isotopique.....	216
Conducteur métallique.....	251	Définition de l'ampère.....	113
Conduction intrinsèque.....	250	Déformation élastique.....	249
Conduction thermique.....	70	Déformation plastique.....	249
Conductivité.....	250, 251	Demi-plan, diffraction par un.....	177
Conductivité spécifique.....	105, 251	Demi-vie.....	236
Conservation de l'énergie.....	20, 21, 26, 28, 34	Densimétrie.....	4
Conservation de l'impulsion.....	20, 21, 26	Densité de corps solides.....	4
Conservation du moment cinétique.....	28	Densité de l'air.....	4

Densité de liquides.....	4	Dosimétrie.....	227, 230
Densité des porteurs de charge.....	250	Dualité onde-corpuscule.....	213
Désintégration radioactive.....	236	Duane et Hunt. loi de.....	229
Détecteur de position à infrarouge.....	6		
Détecteur semiconducteur.....	241	E	
Détermination de e	208	Eau.....	69, 135
Détermination de e/m	144, 209	Echo-sonde.....	52
Détermination de h	210-212, 242	Ecoulement volumétrique.....	61
Détermination de l'activité.....	242	Ecoulement volumétrique.....	61
Détermination du taux de comptage.....	235	Ecran luminescent.....	226
Déviations d'électrons dans un Champ électrique.....	143, 144	Effet Compton.....	229, 243
Déviations d'électrons dans un Champ magnétique..	142-144	Effet de Debye-Sears.....	56
Diagramme distance-temps.....	13-19, 27	Effet Doppler.....	45, 54, 204
Diagramme pV	82, 83, 85	Effet Edison.....	140
Diamagnétisme.....	256	Effet Faraday.....	191
Diapason.....	47	Effet Hall.....	250
Diaphragme à trou, diffraction par un.....	175	Effet Hall anormal.....	250
Différentiateur.....	160	Effet Hall normal.....	250
Diffraction à une onde stationnaire.....	56	Effet Kerr.....	189
Diffraction de la lumière.....	175-177	Effet Meißner-Ochsenfeld.....	255
Diffraction de micro-ondes.....	137	Effet photo-électrique.....	210-212
Diffraction de rayons X.....	229	Effet Pockels.....	190
Diffraction d'ondes à la surface de l'eau.....	46	Effet Seebeck.....	254
Diffraction d'ondes ultrasonores.....	53	Effet Tyndall.....	186
Diffraction d'un faisceau d'électrons.....	213	Effet Zeeman.....	224, 225
Diffraction par des réseaux croisés.....	175	Effet Zeeman anormal.....	225
Diffraction par un demi-plan.....	177	Effet Zeeman normal.....	224
Diffraction par un diaphragme à trou.....	175	Efficacité du transformateur.....	119, 120
Diffraction par un réseau.....	53, 175	Electroaimant.....	111, 122
Diffraction par un réseau.....	46	Electrochimie.....	110
Diffraction par un trait.....	175	Electrolyse.....	109
Diffraction par une fente double.....	46, 53, 137, 175-177	Electromètre.....	89, 90
Diffraction par une fente multiple.....	46, 53, 175, 176	Electromètre absolu.....	98
Diffraction par une fente simple.....	46, 53, 137, 175-177	Electromètre absolu de Kirchhoff.....	98
Diffusion de quanta γ	243	Electrostatique.....	89, 90
Dilatation cubique.....	68	Emetteur.....	135, 137
Diode.....	140, 155, 156	Energie cinétique.....	18, 19
Diode électroluminescente.....	154, 155	Energie électrique.	75, 131, 131, 132.....
Diode en tube.....	140		
Diode Zener.....	154, 155	Energie mécanique.....	10, 11, 18-21, 25, 28, 34, 74
Direction du rayonnement.....	135	Energie thermique.....	74, 75
Directivité d'une antenne.....	139	Equilibre.....	9
Dispersion du Compton.....	232	Equilibre de couples de rotation.....	9
Dispersion du rayon X.....	232	Equivalent électrique de la chaleur.....	75
Distance de cohérence.....	182	Equivalent mécanique de la chaleur.....	74
Distorsion d'image.....	167	Excitation d'atomes.....	220-222
Distorsion d'image en barillet.....	167	Expérience de la tache d'huile.....	207
Distorsion d'image en coussinet.....	167	Extension de la plage de mesure.....	108
Distribution de Poisson.....	235		
Dopage.....	250		

F

Facteur d'allure de courbe	130
Facteur de crête.....	132
Faraday, cage de.....	99
Faraday, constante de.....	109
Fente double, diffraction par une.....	46, 53
Fente double, diffraction par une.....	137,175-177
Fente multiple, diffraction par une	46, 53
Fente multiple, diffraction par une	175-177
Fente simple, diffraction par une	46, 53
Fente simple, diffraction par une	137, 175-177
Fente, diffraction par une.....	46, 53
Fente, diffraction par une	137, 175-177
Ferromagnétisme.....	256, 257
Fibre optique.....	158
Fibres	173
Fibres optiques PMMA.....	173
Filtre coloré.....	173
Filtre de vitesses pour électrons	144
Flexion.....	7
Fluorescence.....	253
Fluorescence X.....	230, 259
Focalisation magnétique.....	142
Force	7-10, 12, 15
Force antagoniste.....	26
Force centrale	25
Force centrifuge et force centripète.....	29, 30
Force coercitive	257
Force dans un champ électrique.....	97, 98
Force de résistance.....	11
Force mesure sur des conducteurs parcourus par un courant.....	113
Force normale	11
Foucault et Michelson, méthode de.....	194
Foucault, courants de	118
Fourier, transformation de.....	55
Foyer, distance focale	166
Franck et Hertz, expérience de.....	221, 222
Fréquence	35, 38-49, 52-55, 134, 135, 137
Fresnel biprisme de.....	179
Fresnel lois de.....	186
Fresnel miroir de	179
Fresnel miroir double de.....	179
Frottement	11, 12
Frottement de glissement.....	12
Frottement de roulement.....	12
Frottement statique.....	11, 12

G

Galilée, lunette de.....	168
Gauß, rayons de.....	202, 203
Gay-Lussac, loi de.....	80
Gaz parfait	80
Gaz réel	78
Geiger-Müller, tube compteur de.....	234
Générateur CA-CC.....	123
Générateur électrique	123, 125
Génératrice à courant triphasé	125
Génératrice à pôles extérieurs.....	123, 125
Génératrice à pôles intérieurs.....	123, 125
Génératrice autoexcitée	123
Germanium dopé n	250
Germanium dopé p	250
Gomme quantique.....	244
Graetz, montage de.....	155
Guide de lumière	173
Guide d'ondes.....	138
Gyroscope.....	31, 32

H

Haute tension.....	120
Helmholtz, bobines de	114
Hémisphère selon Cavendish.....	99
Hologramme	184, 185
Hologramme d'amplitude.....	184, 185
Hologramme de phase.....	184, 185
Hologramme de réflexion à lumière blanche	184
Hologramme de transmission	185
Hooke, loi de.....	249
Huygens, principe de.....	45
Hystérésis	257

I

Impédance.....	126-128
Indice de réfraction	45, 169, 183, 186, 196, 197
Inducteur de terre	121
Induction	115-117, 122
Influence.....	89, 90, 99
Instruments électromécaniques.....	133
Intégrateur	160
Intensité du champ.....	103
Intensité du rayonnement.....	192

Intensité lumineuse.....	192	Loi de la réflexion	45, 52, 165
Interférence	244	Loi de la réfraction	45, 165
Interférence	178	Loi de l'action et de la réaction	21, 26
Interférence à deux faisceaux	46, 53	Loi de l'inverse du carré	237
Interférence de la lumière.....	179	Lois des gaz.....	80
Interférence de micro-ondes	137	Lois des lentilles.....	166
Interférence d'ondes à la surface de l'eau	46	Lois du rayonnement.....	193
Interférence d'ondes ultrasonores.....	53	Longueur d'onde	42-45, 48, 49, 181
Interféromètre.....	181-183	Loupe	168
Interféromètre de Mach-Zehnder.....	183	Lumière blanche	170
Interféromètre de Michelson	181, 182, 244	Lumière fluorescente.....	173
Intervalle de bandes	250	Luminescence.....	253
Isolation thermique.....	70	Lunette astronomique.....	168
		Lunette terrestre	168'
J			
Jet oblique.....	24	M	
		Machine	122-125
K		Machine à courant triphasé	125
Kepler, lunette astronomique.....	168	Machine électrique	123
Kirchhoff loi du rayonnement de.....	193	Machine frigorifique.....	83
Kirchhoff lois de	106	Machines électriques	122, 124, 125
Kirchhoff, lois de	107	Machines simples	10, 11
Klein-Nishina, formule de	243	Magnéton nucléaire.....	225
Kundt, tube de.....	49	Malus, loi de	186
		Masse volumique maximale de l'eau	69
L		Matériaux de construction.....	70
Lambert, loi du rayonnement de.....	192	Maxwell, pont de mesure de.....	129
Largeur de bande interdite	250	Maxwell, roue de.....	34
Laser.....	202-204	Mélange additif des couleurs.....	171
Laser à gaz	202	Mélange des couleurs	171
Laser He-Ne.....	202, 203	Mélange soustractif des couleurs.....	171
Laue, taches de	248	Melde, loi de	44
Lecher, ligne de	136, 138	Mesure de longueurs.....	3
LED	154, 155	Mesure du temps.....	195
Leslie, cube de	193	Mesureur de champ électrique.....	96, 103
Levier	9	Méthode d'arrachement.....	60
Levier à bras inégaux	9	Méthode de la poussière de liège.....	49
Levier à deux bras	9	Méthode du miroir tournant	194
Levier à un bras	9	Micro-ondes	137, 138
Ligne de transition optique	158	Microscope.....	168
Lignes de champ.....	94, 111	Microscope à effet tunnel	258
Lignes de champ magnétique	111	Microscope à émission de champ.....	247
Lignes de Fraunhofer.....	219	Millikan, expérience de.....	208
Lignes équipotentielles	95	Mise en évidence de rayons X	226, 230
Lloyd, expérience de.....	46, 179	Mise en évidence d'un rayonnement radioactif.....	234
Loi de Hooke.....	7	Mobilité des porteurs de charge	250
		Modèle d'implantation.....	226
		Modulateur acousto-optique.....	56

- Modulation d'amplitude 135
 Modulation de fréquence 135
 Modulation de la lumière 190
 Module d'élasticité 7
 Mollier, diagramme de 86
 Moment d'inertie 31, 33
 Moment magnétique 112
 Montage de Littrow 201
 Montage en parallèle de capacités 101
 Montage en parallèle de résistances 106
 Montage en série de résistances 106
 Montage série de capacités 101
 Moseley, loi de 229, 230
 Moteur à air chaud 82-85
 Moteur asynchrone 125
 Moteur électrique 124, 125
 Moteur synchrone 124, 125
 Moteur thermique 82, 84, 85
 Moteur universel 124
 Mouvement avec changement de Direction 17-19
 Mouvement bidimensionnel 25, 26
 Mouvement brownien 79
 Mouvement circulaire 25, 27
 Mouvement de rotation 25-28
 Mouvement de translation 25, 26
 Mouvement moléculaire 79
 Mouvement rectiligne 13-19
 Mouvement unidirectionnel 13-19
 Mouvement uniforme accéléré 13
 Mouvement uniformément. 13, 14, 15, 17, 18, 19, 25, 27, 28
 Mouvement uniformément accéléré 14-19
 Multimètre 130
- N**
- Newton anneaux de 180
 Newton expériences de 170
 Newton, axiome de 26
 Newton, définition du 15
 NMR 240
 Nutation 31, 32
- O**
- Ohm, loi d' 105
 Onde stationnaire 42, 46, 49, 136-138
 Ondes 42-55, 135-139, 175-177, 179-181, 183-185
 Ondes à la surface de l'eau 45, 46
 Ondes circulaires 45
 Ondes de ressort à boudin 42
 Ondes décimétriques 135, 136
 Ondes le long d'une corde 42, 44
 Ondes longitudinales 42
 Ondes rectilignes 45
 Ondes sonores 47, 49-51
 Ondes transversales 42
 Ondes ultrasonores 52-54
 Optique géométrique 165-168
 Optoélectronique 158
 Oscillateur 157
 Oscillation amortie 38, 39
 Oscillation chaotique 39
 Oscillation de torsion 38, 39
 Oscillation harmonique 36-39
 Oscillation non harmonique 39
 Oscillations 35-41, 48, 55
 Oscillations d'une corde 48
 Oscillations électromagnétique 55
 Oscillations électromagnétiques 134
 Oscillations forcées 38, 39
- P**
- Palan 10
 Palmer 3
 Parallélogramme des forces 8
 Paramagnétisme 256
 Paratonnerre à cornes 120
 Paul, piège de 214
 Pendule à ressort 37
 Pendule couplé 40
 Pendule de torsion de Pohl 38-
 Pendule double 40
 Pendule mathématique 35
 Pendule physique 35, 36
 Pendule réversible 35, 36
 Pendule, mathématique et physique 35
 Période d'oscillation 35, 37-41, 81, 134
 Perrin, tube de 143
 Perte énergétique d'un rayonnement α 241
 Phosphorescence 253
 Photoconductivité 252
 Photodiode 158
 Photoélasticité 187
 Photorésistance 153, 252
 Phototransistor 158
 Pic d'absorption 229
 Pied à coulisse 3, 3
 Piège à ions 214

Pile solaire.....	152
Plan incliné.....	11, 25
Planck, constante de -	210-212, 229
Point critique.....	78
Polarimètre.....	188
Polarimètre à pénombre.....	188
Polarisation circulaire.....	44, 187
Polarisation de la lumière.....	186-191
Polarisation de micro-ondes.....	137
Polarisation d'ondes décimétriques.....	135
Polarisation elliptique.....	187
Polarité des électrons.....	143
Pompage optique.....	225
Pompe à chaleur.....	83, 84, 86
Pont de mesure de Maxwell.....	129
Pont de mesure de Wheatstone.....	106, 107
Pont de mesure de Wien.....	129
Potentiel.....	96
Potentiels de référence.....	110
Potentiomètre.....	106
Poulie.....	9
Poulie fixe.....	10
Poulie mobile.....	10
Poussée verticale.....	58, 63
Pouvoir dispersif des liquides.....	169
Pouvoir dispersif du verre.....	169
Précession.....	31, 32
Pression.....	57
Pression de vapeur.....	77
Pression dynamique.....	61
Pression hydrostatique.....	57
Pression statique.....	61
Pression totale.....	61
Principe de la fusée.....	20
Principe de superposition.....	24, 24, 25
Profil d'aile.....	62, 63
Profileur rayon.....	203
Propagation d'électrons.....	142
Propagation d'ondes à la surface de l'eau.....	45
Puissance active.....	132
Puissance apparente.....	132
Puissance électrique.....	131, 132
Puissance réactive.....	132
Pycnomètre.....	4

Q

Quantification.....	184, 186, 187, 193
Quartz lévogyre, dextrogyre.....	188

R

Radiation d'annihilation.....	242
Radioactivité.....	234, 235
Radiographie.....	226
Raie de H α	215
Raie de K α	229
Raies D du sodium.....	199
Rapport d'ondes stationnaires.....	138
Rayon de courbure.....	3
Rayonnement caractéristique.....	229
Rayonnement de freinage.....	229
Rayonnement α	237
Rayonnement β	237
Rayonnement γ	237
Rayons canaux.....	147
Rayons cathodiques.....	147
Rayons de Gauß.....	202, 203
Rayons X.....	226-230, 248, 259
Réactance.....	126-128
Recul.....	20
Redressement.....	140, 155
Redresseur demi-onde.....	156
Redresseur en pont.....	156
Redresseur pleine-onde.....	156
Réflexion de la lumière.....	165
Réflexion de micro-ondes.....	137
Réflexion d'ondes à la surface de l'eau.....	45
Réflexion d'ondes ultrasonores.....	52
Réflexion totale de micro-ondes.....	137
Réfraction de la lumière.....	165
Réfraction de micro-ondes.....	137
Réfraction d'ondes à la surface de l'eau.....	45
Règles de base de la mécanique.....	10, 11
Régulateur à deux points.....	162
Régulateur PID.....	162
Régulation.....	162
Régulation de la luminosité.....	162
Régulation de la tension.....	162
Relais.....	133
Rémanence.....	257, 257
Rendement de la pompe à chaleur.....	86
Rendement du capteur solaire.....	71
Rendement du moteur à air chaud.....	84
Répartition de la charge.....	99
Réponse en fréquence.....	130
Réseau cristallin.....	247, 248
Réseau holographique.....	201, 216, 218
Réseau, diffraction par un.....	46
Réseau, diffraction par un.....	53, 175

Réseaux croisés.....	175	Spectre d'absorption	217
Résistance capacitive.....	126, 128, 129	Spectre de deutérium.....	216
Résistance CTN.....	153	Spectre de d'hydrogène.....	216
Résistance CTP.....	153	Spectre de mercure.....	218
Résistance de l'air	62, 63	Spectre de raies.....	198, 199, 215, 217
Résistance en courant alternatif.....	128	Spectre d'émission	217
Résistance inductive.....	127-129	Spectre d'un rayonnement α	241
Résistance interne.....	108, 151, 152	Spectre d'un rayonnement β	242
Résistance ohmique.....	105-108	Spectre d'un rayonnement γ	242
Résistance particulière.....	153	Spectre énergétique de rayons X.....	229, 230
Résistance spécifique.....	251	Spectre rayons X.....	230, 259
Résonance	38, 128	Spectres d'émission	219
Résonance de spin électronique.....	223	Spectres d'absorption	173
Résonance de spin nucléaire.....	240	Spectres de décharges gazeuses.....	219
Résonateur	202	Spectres de réflexion	174
Ressort	7	Spectromètre.....	173, 174, 198, 219
Ressort à boudin.....	7, 37	Spectromètre à prisme	198
Ressort à boudin de Wilberforce	41	Spectromètre à réseau.....	199-201
Ressort à lame	7	Sphéromètre	3
Rotation du plan de polarisation	188, 191	Spin	223-225, 240
Rotor	122-125	Spin électronique	223-225
Rotor bipolaire	124	Spin nucléaire.....	225, 240
Rotor tripolaire.....	124	Spin orbital.....	224, 225
Roue de Maxwell.....	34	Stator.....	122-125
RSE.....	223	Stefan-Boltzmann, loi de.....	193
Rüchardt.....	81	Steiner, théorème de	33
Rutherford, diffusion de.....	239	Stirling, cycle de	82-85
Rydberg, constante de	229	Structure fine	231
S		Structure fine de rayons X.....	231
Saccharimètre	188	Structure hyperfine	225
Saut de tension.....	115	Supraconducteur à température élevée.....	255
Scoponde.....	43	Supraconductivité.....	255
Sections transversales.....	203	Surface équipotentielle.....	96
Semiconducteur.....	251	T	
Séparateur de tension	106	TTaille des atomes	207, 248
Série de tension	110	Taille des molécules	207
Snellius, loi de	45, 165	Télescope	168
Solution de glucose, concentration.....	188	TEM modes.....	203
Son	55	Température.....	72
Sonde à flamme.....	96	Température critique	255
Sonnette	133	Température de mélange.....	72
Source de courant.....	151, 152	Tension de crête.....	132
Source de courant constant.....	151	Tension efficace.....	132
Source de tension.....	151, 152	Tension superficielle	60
Source de tension constante	151	Tension thermoélectrique.....	254
Soustracteur	160	Test à la flamme	219
Spath d'Islande.....	187	Théorie cinétique des gaz	79-81
Spectre	198, 217	Thermoélectricité	254

Thermo émission dans le vide	143	de tension.....	195
Thermomètre à gaz.....	80	Vitesse d'écoulement	204
Thomson, tube de.....	144	Vitesse du son dans l'air.....	50
Tomographie	233	Vitesse du son dans les gaz.....	50
Tomographie à rayons X.....	233	Vitesse du son dans les solides	51
Trait, Diffraction par un.....	175	Vitesse du vent	61
Trajectoire parabolique.....	24	Volumétrie.....	4
Trajectoires de particules.....	238		
Trajet conoscopique du faisceau.....	190	W	
Transformateur.....	119, 120	Wagner, marteau de.....	133
Transformateur chargé.....	119	Waltenhofen, pendule de.....	118
Transistor	156, 157	Wheatstone, pont de.....	106, 107
Transistor à effet de champ	156, 157	Wien, pont de mesure de.....	129
Transistor bipolaire.....	156	Wilberforce, Ressort à boudin.....	41
Transition de phase.....	76-78		
Transitions entre deux quanta	225	Y	
Transmission de filtres.....	200	Young, expérience de	46
Transmission de puissance d'un transformateur	120	Young, expérience de	53, 137, 175-178
Transport de la charge.....	104		
Travail électrique	75, 82-85, 131, 132	Z	
Travail mécanique	10, 11, 18, 19, 74, 82-85	Z-Diode.....	133, 134
Triode	141	Zeeman Effet.....	206
Triode en tube	141		
Trous mobile.....	250, 252		
Tube à croix de Malte.....	142		
Tube à faisceau électronique filiforme.....	209		
Tube compteur	234		
Tunnel aérodynamique.....	63		
U			
Ultrason	56		
Ultrason en liquides.....	56		
V			
Variations de température	70		
Venturi, tube de.....	61		
Verdet, constante de	191		
Vernier.....	3		
VidéoCom	16, 19, 21, 23, 40, 177, 200, 216, 218		
Viscosimètre à chute de bille.....	59		
Viscosité.....	59		
Vitesse.....	13, 15, 17-19		
Vitesse angulaire	27, 28		
Vitesse de la lumière	194-197		
Vitesse de phase.....	42-45		
Vitesse de propagation des ondes.....	43-45		
Vitesse de propagation d'impulsions			

ENREGISTREZ-VOUS DÈS MAINTENANT
POUR RECEVOIR GRATUITEMENT

LA NEWSLETTER !

- Dernières informations sur les nouveaux produits
- Des idées pour l'enseignant
- Des expériences sélectionnées
- Des informations actualisées sur les produits et les solutions
- Des offres spéciales



<https://info.ld-didactic.de/newsletter-subscription>



SUIVEZ-NOUS !



Visitez notre chaîne
YouTube pour regarder des
vidéos de nos produits, des
expériences et plus encore.

<https://www.youtube.com/user/LDdidactic>



SUIVEZ-NOUS !

<https://www.linkedin.com/company/ld-didactic-gmbh>



LAURÉATS DU PRIX NOBEL

EXPÉRIENCES LD

Le Id DIDACTIC propose diverses expériences de prix Nobel. Découvrez une sélection d'expériences permettant aux étudiants d'apprendre et de comprendre les contributions exceptionnelles du lauréat du prix Nobel.

LAUREATE

1901 W. C. Röntgen (1845 - 1923, Allemagne)

Découverte de remarquables rayons qui porteront par la suite le nom de Rayon X.



P6.3.3.1
Réflexion de Bragg : diffraction de rayon X sur un cristal

PAGE 207

1923 R. A. Millikan (1868 - 1953, USA)

Travaux sur la charge électrique élémentaire



P6.1.2.4
Détermination de la charge élémentaire électrique selon Millikan et mise en évidence de la quantification de la charge - Mesure de la vitesse d'ascension et de la vitesse de chute avec CASSY

PAGE 193

1925 J. Franck (1882 - 1964, Allemagne)
G. Hertz (1887 - 1975, Allemagne)

Découverte des lois régissant l'impact d'un électron sur un atome



P6.2.4.2
Expérience de Franck-Hertz avec le mercure - Tracé et évaluation avec CASSY

PAGE 203

1972 J. Bardeen (1908 - 1991, USA)
L. N. Cooper (1930 - 2017, USA)
J. R. Schrieffer (1931-2019, USA)

Développement de la théorie de la supraconductivité (théorie BCS)



P7.2.6.1
Détermination de la température critique d'un supraconducteur à haute température

PAGE 242

1985 K. von Klitzing (1943, Allemagne)

Découverte de l'effet Hall quantifié



P7.2.1.3
Détermination de la densité de porteurs de charge et de la mobilité dans le germanium dopé n

PAGE 237

NOBEL PRIZE

PHYSIQUE

1907 A. A. Michelson (1852 - 1931, USA)

Recherches spectroscopiques et métrologiques



P5.3.4.2

Détermination de la longueur d'onde d'un faisceau laser He-Ne à l'aide d'un interféromètre de Michelson

PAGE 158

1908 E. Rutherford (1871 - 1931, Nouvelle Zélande)

Recherches sur la désintégration des éléments



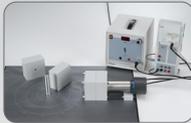
P6.5.2.1

Diffusion de Rutherford : mesure du taux de diffusion en fonction de l'angle de diffusion et du numéro atomique

PAGE 223

1927 A. H. Compton (1892 - 1962, USA)

Découverte de l'effet qui porte son nom (effet Compton)



P6.5.6.1

Observation quantitative de l'effet Compton

PAGE 227

1952 F. Bloch (1905 - 1983, Suisse)
M. Purcell (1912 - 1997, USA)

Mise au point de nouvelles méthodes pour les mesures magnétiques nucléaires de précision



P6.5.3.1

Résonance de spin nucléaire du polystyrène, de la glycérine et du téflon

PAGE 224

2009 Ch. K. Kao (1933 - 2018, Chine)

Utilisations de transmission de la lumière dans les fibres optiques pour les communications



P5.8.7.3

Etudes des fibres optiques en verre

PAGE 187

LAUREATE

EXPERTS EN ÉDUCATION LEYBOLD

DANS LE MONDE ENTIER ET AU COIN DE LA RUE



LD DIDACTIC EST REPRÉSENTÉ par des experts en éducation dans le monde entier.

Ils sont à votre disposition pour vous conseiller sur vos produits et vos montages expérimentaux ou pour vous proposer des offres ou répondre à d'autres questions que vous pourriez avoir.

POUR TROUVER L'EXPERT EN ÉDUCATION
RESPONSABLE DE VOTRE RÉGION, SCANNEZ LE
CODE QR OU CLIQUEZ SUR LE LIEN.



<https://www.ld-didactic.com/contact-us>

RECEVOIR UNE OFFRE



RECEVEZ UNE OFFRE PERSONNALISEE RAPIDE ET FACILE

VOUS POUVEZ CHOISIR PARMIS PLUS DE
10,000 PRODUITS ET PLUS DE **2,500** MONTAGES
EXPERIMENTAUX.

1. Connectez-vous à notre catalogue en ligne
<http://www.leybold-shop.com>
2. Sélectionner votre produits ou votre expérience.
3. Insérer votre produit ou votre expérience dans votre panier en cliquant sur "AJOUTER A LA LISTE DE PRODUITS".
4. Ouvrez votre panier et cliquer sur "**m'envoyer une offre**".

Vous serez contacté par notre conseiller technique.

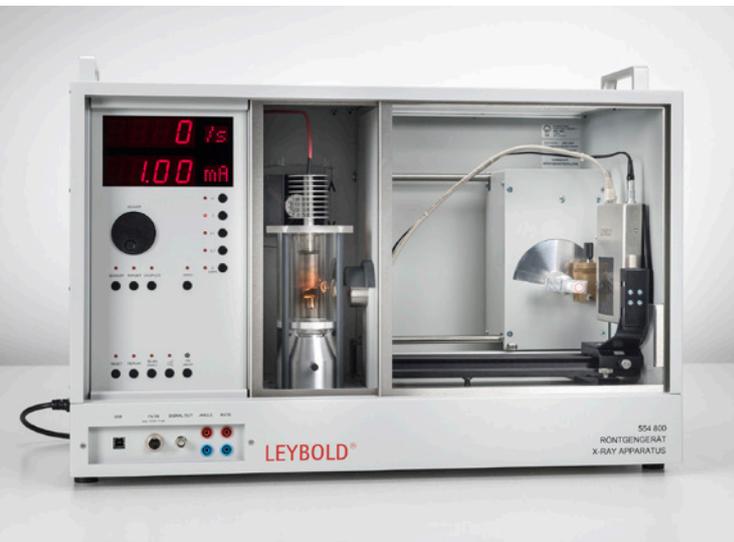
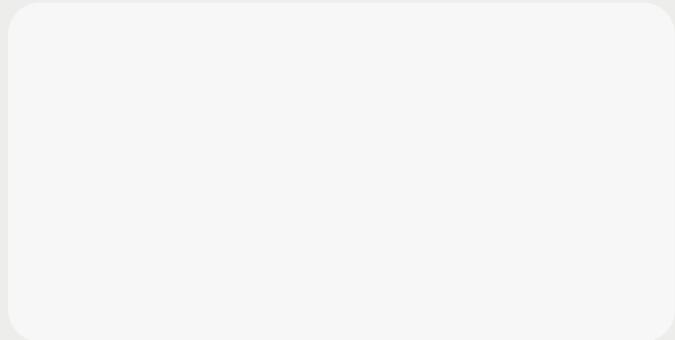


1200400FR 07.2021 LD
Technical details subject to change without notice.

CONTACT

FRANCE:

SYSTÈME DIDACTIQUE
242 Rue Maurice Herzog
F 73420 VIVIERS DU LAC
France
TEL: 04 56 42 80 70
FAX: 04 56 42 80 71
E-MAIL: xavier.granjon@systemes-didactiques.fr
www.systemes-didactiques.fr



WWW.LD-DIDACTIC.COM

BRANDS OF THE LD DIDACTIC GROUP

LEYBOLD® **Feedback** **ELWE**® **TECHNIK**