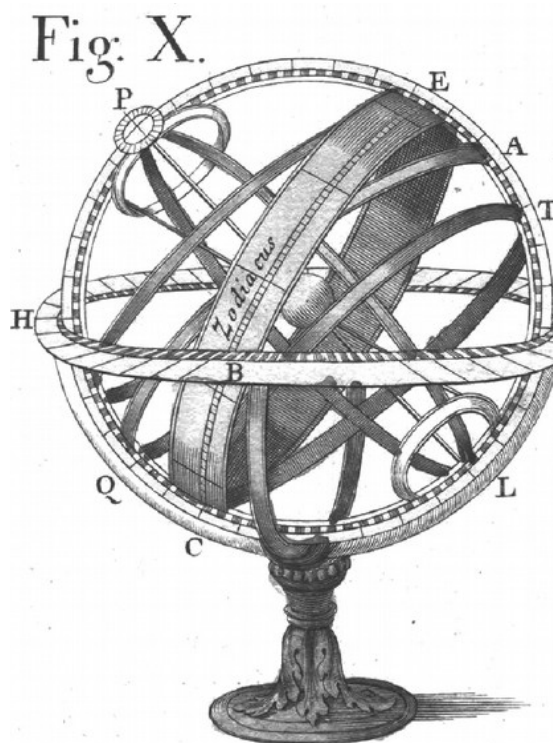
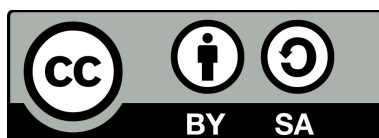

Plans pour les montages de physique de l'agrégation

Année 2013 – 2014



Ce document propose un ensemble de plans pour l'épreuve orale de montage de physique de l'agrégation de physique-chimie - option physique. Il faut les voir comme une aide à la rédaction de vos propres plans qui doivent être personnels.



Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions 4.0 International. Fondée sur une œuvre

hébergée sur :

www.phy-chim.blogspot.fr

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 1. MONTAGE N°1 : DYNAMIQUE NEWTONIENNE..... | 1 |
| 1.1. Lois de conservation | |
| 1.1.1. Conservation de l'impulsion | |
| 1.1.2. Conservation de l'énergie | |
| 1.1.3. Conservation du moment cinétique (facultatif) | |
| 1.2. Applications des lois de conservation : étude de la précession gyroscopique | |
| 1.3. Exemple de phénomènes dissipatifs : les frottements | |
| 2. MONTAGE N°2 : SURFACES ET INTERFACES..... | 2 |
| 2.1. Méthodes de mesure du coefficient de tension de surface | |
| 2.1.1. Mesure par arrachement | |
| 2.1.2. Loi de Jurin | |
| 2.2. Propagation d'ondes à l'interface entre deux milieux | |
| 2.3. Les frottements | |
| 3. MONTAGE N°3 : DYNAMIQUE DES FLUIDES..... | 4 |
| 3.1. Écoulement à faible nombre de Reynolds | |
| 3.2. Écoulement à grand nombre de Reynolds | |
| 3.2.1. Mesure de la vitesse d'un écoulement | |
| 3.2.2. Mesure de la portance d'une aile d'avion | |
| 3.2.3. Propagation d'ondes à l'interface d'un liquide | |
| 4. MONTAGE N°4 : CAPTEURS DE GRANDEURS MÉCANIQUES..... | 5 |
| 4.1. Capteur de position | |
| 4.2. Capteurs de vitesse | |
| 4.2.1. Mesure de la vitesse d'un objet | |
| 4.2.2. Mesure de la vitesse d'un écoulement | |
| 4.3. Capteur de contrainte | |
| 5. MONTAGE N°5 : MESURE DE TEMPÉRATURE..... | 6 |
| 5.1. Mesure des basses températures | |
| 5.2. Mesures de température intermédiaires | |
| 5.2.1. Construction d'une échelle de température | |
| 5.2.2. Application : étalonnage d'une thermistance | |
| 5.3. Mesure des hautes températures | |
| 6. MONTAGE N°6 : TRANSITIONS DE PHASE..... | 7 |
| 6.1. Transition de phase d'ordre 1 | |
| 6.1.1. Mesure d'une chaleur latente de changement d'état | |
| 6.1.2. Température de changement d'état | |
| 6.1.3. Point triple | |
| 6.2. Transitions de phase d'ordre 2 | |
| 6.2.1. Transition liquide/gaz → fluide supercritique | |
| 6.2.2. Transition ferromagnétique → paramagnétique du fer | |
| 7. MONTAGE N°7 : INSTRUMENTS D'OPTIQUES..... | 9 |
| 7.1. Étude détaillée du microscope | |
| 7.1.1. Étude de l'objectif | |
| 7.1.2. Étude de l'oculaire | |
| 7.1.3. Étude globale | |
| 7.2. Diaphragme de champ et d'ouverture | |
| 7.3. Limitations des optiques | |
| 8. MONTAGE N°8 : INTERFÉRENCES LUMINEUSES..... | 11 |
| 8.1. Interférences par division du front d'onde | |
| 8.2. Interférences à division d'amplitude, applications | |

| | |
|--|-----------|
| 8.2.1. Réglage d'un interféromètre de Michelson en lame d'air | |
| 8.2.2. Application : spectroscopie en transformée de Fourier | |
| 8.3. Interférences et polarisation | |
| 9. MONTAGE N°9 : DIFFRACTION DES ONDES LUMINEUSES..... | 12 |
| 9.1. Mise en évidence de la diffraction | |
| 9.2. Diffraction par des motifs répétés | |
| 9.2.1. Cas des motifs ordonnés | |
| 9.2.2. Cas des motifs répartis de manière aléatoire | |
| 9.3. Filtrage spatiale : expérience d'Abbe | |
| 10. MONTAGE N°10 : SPECTROMÉTRIE OPTIQUE..... | 13 |
| 10.1. Principe d'un spectroscopie à fente unique | |
| 10.2. Pouvoir de résolution d'un spectroscopie | |
| 10.3. Application : série de Balmer de l'hydrogène | |
| 10.4. Spectrométrie par transformée de Fourier | |
| 11. MONTAGE N°11 : ÉMISSION ET ABSORPTION DE LA LUMIÈRE..... | 15 |
| 11.1. Émission spontanée de la lumière | |
| 11.2. Absorption de la lumière et énergie de gap : étude du phosphore de gallium GaP | |
| 11.3. Spectre d'absorption et d'émission d'un colorant organique : la rhodamine 610 | |
| 11.4. Application : Dosage par spectrophotométrie | |
| 12. MONTAGE N°12 : PHOTORÉCEPTEURS..... | 16 |
| 12.1. La photodiode | |
| 12.1.1. Caractéristique | |
| 12.1.2. Linéarité | |
| 12.1.3. Réponse spectrale | |
| 12.1.4. Temps de réponse | |
| 12.2. Utilisation d'un détecteur thermique | |
| 12.3. Application : production d'énergie | |
| 13. MONTAGE N°13 : BIRÉFRINGENCE, POUVOIR ROTATOIRE..... | 18 |
| 13.1. Biréfringence naturelle, caractérisation et mesure | |
| 13.2. Biréfringence et polarisation | |
| 13.3. Pouvoir rotatoire naturel | |
| 13.4. Polarisation induite : effet Faraday | |
| 14. MONTAGE N°14 : POLARISATION DES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES..... | 19 |
| 14.1. Production et analyse des ondes polarisées rectilignement | |
| 14.1.1. Polarisation des ondes centimétriques | |
| 14.1.2. Polarisation par réflexion vitreuse | |
| 14.2. Production et analyse d'autres formes de polarisation | |
| 14.2.1. Action des milieux biréfringents | |
| 14.2.2. Analyse d'une onde polarisée elliptiquement | |
| 15. MONTAGE N°15 : PRODUCTION ET MESURE DE CHAMPS MAGNÉTIQUES..... | 20 |
| 15.1. Mesure des champs magnétiques | |
| 15.2. Production de champs magnétiques | |
| 15.3. Mesure d'un champ magnétique naturel | |
| 16. MONTAGE N°16 : MILIEUX MAGNÉTIQUES..... | 22 |
| 16.1. Les différents comportements | |
| 16.2. Les milieux paramagnétiques | |
| 16.3. Les milieux ferromagnétiques | |
| 16.3.1. Comportement vis à vis d'une excitation magnétique | |
| 16.3.2. Comportement vis à vis de la température | |
| 17. MONTAGE N°17 : MÉTAUX..... | 23 |
| 17.1. Propriétés électriques | |
| 17.2. Propriétés thermiques | |

| | |
|---|-----------|
| 17.3. Propriétés mécaniques | |
| 17.4. Propriétés magnétiques | |
| 18. MONTAGE N°18 : MATÉRIAUX SEMI-CONDUCTEURS..... | 24 |
| 18.1. Influence de la température | |
| 18.2. Application : mesure de champs magnétiques | |
| 18.3. Comportement spectral | |
| 18.4. Application : production d'énergie | |
| 19. MONTAGE N°19 : EFFETS CAPACITIFS..... | 26 |
| 19.1. Mesure des capacités | |
| 19.1.1. <i>Mesure par la méthode des ponts</i> | |
| 19.1.2. <i>Mesure par relaxation</i> | |
| 19.2. Influence des caractéristiques du condensateur sur la capacité. | |
| 19.3. Application : mesure de niveau d'eau | |
| 19.4. Inconvénients des effets capacitifs | |
| 20. MONTAGE N°20 : INDUCTION, AUTO-INDUCTION..... | 27 |
| 20.1. Mesure d'une inductance propre | |
| 20.2. Mesure d'une inductance mutuelle | |
| 20.3. Application : le transformateur | |
| 20.4. Application : le fluxmètre | |
| 21. MONTAGE N°21 : PRODUCTION ET CONVERSION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE..... | 28 |
| 21.1. Production d'électricité photovoltaïque | |
| 21.2. Adapter la tension d'alimentation d'un appareil | |
| 21.3. La problématique du transport de l'électricité | |
| 21.4. La conversion alternatif-continu | |
| 22. MONTAGE N°22 : AMPLIFICATION DE SIGNAUX..... | 30 |
| 22.1. L'amplificateur opérationnel (AO) | |
| 22.1.1. <i>Le compromis gain-bande</i> | |
| 22.1.2. <i>Limitations</i> | |
| 22.2. Le transistor bipolaire | |
| 22.2.1. <i>Gain en courant</i> | |
| 22.2.2. <i>Le Push-Pull</i> | |
| 23. MONTAGE N°23 : MISE EN FORME, TRANSPORT ET DÉTECTION DE L'INFORMATION..... | 33 |
| 23.1. La modulation/démodulation d'amplitude | |
| 23.2. La modulation/démodulation de fréquence | |
| 23.3. La problématique du transport | |
| 23.3.1. <i>Transport électrique</i> | |
| 23.3.2. <i>Transport lumineux</i> | |
| 24. MONTAGE N°24 : ACQUISITION, ANALYSE ET TRAITEMENTS DES SIGNAUX..... | 34 |
| 24.1. Les méthodes analogiques | |
| 24.1.1. <i>Le traitement analogique</i> | |
| 24.1.2. <i>Analyseur de spectre analogique</i> | |
| 24.2. Les méthodes numériques | |
| 24.2.1. <i>La conversion analogique numérique</i> | |
| 24.2.2. <i>Le traitement numérique</i> | |
| 25. MONTAGE N°25 : MESURE DES FRÉQUENCES TEMPORELLES (OPTIQUE EXCLUE)..... | 36 |
| 25.1. Mesure de fréquences en électricité | |
| 25.2. <i>Méthodes analogiques</i> | |
| 25.3. <i>Méthodes numériques</i> | |
| 25.4. Mesure de fréquences en mécanique et acoustique | |
| 25.4.1. <i>Par stroboscopie</i> | |
| 25.4.2. <i>Par hétérodynage</i> | |
| 26. MONTAGE N°26 : MESURE DE LONGUEURS..... | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 26.1. Mesure des grandes distance | |
| 26.2. Mesure des petits distances | |
| 26.2.1. <i>Par diffraction lumineuse</i> | |
| 26.2.2. <i>Par diffraction électronique</i> | |
| 26.3. Mesure des très petites longueurs (d'onde) | |
| 27. MONTAGE N°27 : SYSTÈMES BOUCLÉS..... | 39 |
| 27.1. Réalisation d'un oscillateur quasi-sinusoïdaux | |
| 27.2. Les oscillateurs à relaxation, réalisation et applications | |
| 27.3. Asservissement, stabilité, rapidité et précision | |
| 28. MONTAGE N°28 : INSTABILITÉS ET PHÉNOMÈNES NON LINÉAIRES..... | 40 |
| 28.1. Du linéaire au non linéaire | |
| 28.2. Instabilités et phénomènes non linéaires en électricité | |
| 28.2.1. <i>Critère de stabilité, instabilités et non linéarités</i> | |
| 28.2.2. <i>Construction d'un oscillateur non linéaire</i> | |
| 28.3. Phénomène de bifurcation fourche | |
| 29. MONTAGE N°29 : ONDES, PROPAGATION ET CONDITIONS AUX LIMITES..... | 42 |
| 29.1. Ondes acoustiques, conditions aux limites et modes propres | |
| 29.1.1. <i>Propagation libre des ondes sonores</i> | |
| 29.1.2. <i>Propagation guidée des ondes sonores</i> | |
| 29.2. Propagation d'ondes mécaniques à l'interface entre deux milieux | |
| 29.3. Propagation d'ondes électromagnétiques en régime guidé | |
| 30. MONTAGE N°30 : ACOUSTIQUE..... | 43 |
| 30.1. Propagation libre et guidée d'une ondes sonores | |
| 30.1.1. <i>Propagation libre des ondes sonores</i> | |
| 30.1.2. <i>Propagation guidée des ondes sonores</i> | |
| 30.2. Application : mesure de la vitesse d'un objet | |
| 30.3. Application : mesure du module d'Young du Duralumin | |
| 31. MONTAGE N°31 : RÉSONANCE..... | 44 |
| 31.1. Phénomènes de résonance en électricité | |
| 31.1.1. <i>Étude d'un système électrique résonant</i> | |
| 31.1.2. <i>Influence du couplage de plusieurs systèmes résonants</i> | |
| 31.2. Phénomènes de résonance en mécanique | |
| 31.2.1. <i>Conditions aux limites et quantification</i> | |
| 31.2.2. <i>Résonance aiguë : application</i> | |
| 32. MONTAGE N°32 : COUPLAGE DES OSCILLATEURS..... | 46 |
| 32.1. Couplage d'oscillateurs mécaniques | |
| 32.2. Couplage par mutuelle de deux circuits électriques | |
| 32.3. Couplage de deux oscillateurs électriques | |
| 32.4. Couplage de N oscillateurs électriques | |
| 33. MONTAGE N°33 : RÉGIMES TRANSITOIRES..... | 48 |
| 33.1. Régime transitoire et diffusion | |
| 33.2. Régime transitoire en électricité | |
| 33.2.1. <i>Réponse indicielle d'un circuit RLC</i> | |
| 33.2.2. <i>Limitation des temps de réponse des détecteurs</i> | |
| 33.2.3. <i>Régime transitoire et asservissement</i> | |
| 34. MONTAGE N°34 : PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT..... | 49 |
| 34.1. La diffusion/conduction | |
| 34.1.1. <i>La diffusion de particules</i> | |
| 34.1.2. <i>La conduction thermique</i> | |
| 34.1.3. <i>La conduction électrique</i> | |
| 34.2. Le rayonnement | |
| 34.3. La convection | |

| | |
|---|-----------|
| 35. MONTAGE N°35 : MOTEURS..... | 51 |
| 35.1. Les moteurs électriques | |
| 35.1.1. <i>Le moteur électrique continu</i> | |
| 36. <i>Le moteur asynchrone</i> | |
| 37. Exemple de moteur thermique : le moteur de Stirling | |

1. Montage n°1 : Dynamique Newtonienne

De nombreux phénomènes courants sont descriptibles à l'aide de la mécanique classique. Dans ce domaine, les invariances des problèmes considérés se traduisent par la conservation de certaines quantités (énergie mécanique, moment cinétique, ...). La conversion d'une forme d'énergie vers une autre est bien souvent partielle du fait de l'existence de phénomènes dissipatifs comme les frottements.

1.1. Lois de conservation

1.1.1. Conservation de l'impulsion

À l'aide de deux mobiles autoporteurs (de masses différentes) réaliser un enregistrement d'un choc élastique (pour simplifier on peut partir d'une situation où l'un des mobiles est immobile. Tracer les vecteurs impulsion initiaux et finaux. Construire ensuite le vecteur impulsion total initial et le vecteur impulsion total final. Remarquer que le vecteur impulsion total est conservé en norme, direction et sens.

⚠ Il faut travailler très proprement pour avoir des résultats corrects.

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome I, La mécanique, Quaranta, « quantité de mouvement »

1.1.2. Conservation de l'énergie

Étudier la chute libre d'une bille métallique à l'aide d'une caméra rapide. Relever la hauteur de la bille en fonction du temps. En déduire la vitesse à chaque instant en effectuant la dérivée point à point.

⚠ Le relevé de la position au cours du temps doit être fait précisément et en évitant les erreurs de parallaxe sinon la dérivée point à point sera de mauvaise qualité.

En déduire l'énergie cinétique, l'énergie potentielle et enfin l'énergie mécanique à chaque instant. Remarquer que cette dernière est conservée.

Le mouvement de chute a pour équation $z(t) = z_0 + v_0 \cdot t + 1/2 \cdot g \cdot t^2$. La courbe $v = f(t)$ permet d'évaluer g (avec une précision de trois chiffres significatifs !).

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome I, La mécanique, Quaranta, « chute libre »

1.1.3. Conservation du moment cinétique (facultatif)

Faire tourner un mobile autoporteur autour d'un axe fixe les deux étant reliés par un ressort. Effectuer une acquisition et montrer que la loi des aires est vérifiées. En effet la force exercée par le ressort est centrale.

☺ Il est conseillé d'étudier un mouvement quasi-circulaire pour avoir des résultats corrects

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome I, La mécanique, Quaranta, «Forces centrales»

1.2. Applications des lois de conservation : étude de la précession gyroscopique

Lorsqu'un gyroscope en rotation à la vitesse Ω est soumis au moment Γ d'une force, il tend à évoluer de manière à conserver son moment cinétique. Le moment sera matérialisé par un déplacement d d'une masse ce qui va déséquilibrer le gyroscope ($\Gamma = m \cdot g \cdot d$). Il se mettra alors à précesser à la vitesse ω autour de l'axe verticale (il faut à tout prix éviter la nutation). Dans l'approximation gyroscopique, on aura alors la relation suivante : $\Gamma = J \cdot \omega \cdot \Omega$ ou J est le moment d'inertie du gyroscope par rapport à son axe de rotation. Faire quelques mesures pour des valeurs de d différentes et tracer $\Gamma = f(\omega, \Omega)$. En déduire J et comparer à la valeur donnée.

☺ La valeur du moment d'inertie cherché est marquée directement sur le gyroscope

■ Notice du gyroscope n°34

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome I, La mécanique, Quaranta, « Gyroscope »

1.3. Exemple de phénomènes dissipatifs : les frottements

On étudie d'abord les frottements statiques à l'aide d'un palet en bois posé sur une planche de bois. Le palet de masse M_1 est lesté par la masse m_1 posée sur ce dernier. Le palet est relié à une masse M_2 suspendue dans le vide (utiliser une poulie). Pour différentes valeurs de m_1 déterminer la masse M_2 à partir de laquelle le glissement s'amorce. En déduire le coefficient de frottement statique f_s ($m_2 = f_s \cdot (M_1 + m_1)$) et vérifier la loi de Coulomb.

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome I, La mécanique, Quaranta, « Frottements »

Une manipulation est proposée dans la notice n°203 pour l'étude du coefficient de frottement dynamique f_d . Évaluer f_d . Constaté que $f_d < f_s$.

■ Notice de l'expérience n°203

■ Bulletin de l'union des physiciens n°474

2. Montage n°2 : Surfaces et interfaces

2.1. Méthodes de mesure du coefficient de tension de surface

2.1.1. Mesure par arrachement

On mesure le coefficient de tension de surface de l'eau par la méthode de l'arrachement. On utilise pour cela une balance d'arrachement et une lame mouillante. À la limite de l'arrachement on peut écrire $F = 2 \gamma L$. Comparer à la valeur tabulée.

⚠ La lame doit être extrêmement propre et l'eau très pure, il faut manipuler très soigneusement.

■ Hydrodynamique physique, Guyon – Hulin – Petit, EDP sciences, 2^{ème} édition, chapitre 1

2.1.2. Loi de Jurin

On vérifie la loi de Jurin qui prédit que la hauteur de montée d'un fluide dans un capillaire est

donnée par : $h = \frac{2 \cdot \gamma}{\rho \cdot g \cdot r} \cos(\theta)$. L'expérience est menée avec de l'éthanol pur. On peut en

déduire le coefficient de tension de surface de ce liquide. Comparer à la valeur tabulée.

☺ Dans notre cas $\theta \sim 0$ et la formule se simplifie

- Hydrodynamique physique, Guyon – Hulin – Petit, EDP sciences, 2^{ème} édition, chapitre 1
- CRC Handbook (83^{ème} édition)

2.2. Propagation d'ondes à l'interface entre deux milieux

On se propose maintenant d'étudier la propagation d'ondes surfaciques à l'interface entre l'eau et l'air. Pour cela on utilise une cuve à onde. Pour chaque valeur de la fréquence d'excitation, mesurer la longueur d'onde des ondes à la surface de l'eau. Ajuster par la formule théorique :

$$\omega^2 = th(k \cdot h) \times \left(g \cdot k + \frac{\gamma \cdot k^3}{\rho} \right)$$

h est la hauteur d'eau, γ le coefficient de tension superficielle air-eau et ρ la masse volumique de l'eau.

☺ Il faut contraindre la valeur de g à 9,81 N/m dans la formule.

☺ Comme $k \cdot h$ est grand, $th(k \cdot h) \sim 1$ ce qui simplifie la formule.

- Hydrodynamique physique, Guyon – Hulin – Petit, EDP sciences, 2^{ème} édition, chapitre 6
- Notice de la cuve à onde n°614
- CRC Handbook 83^{ème} édition (pour la valeur de γ)

2.3. Les frottements

On étudie d'abord les frottements statiques à l'aide d'un palet en bois posé sur une planche de bois. Le palet de masse M_1 est lesté par la masse m_1 posée sur ce dernier. Le palet est relié à une masse M_2 suspendue dans le vide (utiliser une poulie). Pour différentes valeurs de m_1 déterminer la masse M_2 à partir de laquelle le glissement s'amorce. En déduire le coefficient de frottement statique f_s ($m_2 = f_s \cdot (M_1 + m_1)$) et vérifier la loi de Coulomb.

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome I, La mécanique, Quaranta, « Frottements »

Une manipulation est proposée dans la notice n°203 pour l'étude du coefficient de frottement dynamique f_d . Évaluer f_d . Constaté que $f_d < f_s$.

- Notice de l'expérience n°203
- Bulletin de l'union des physiciens n°474

3. Montage n°3 : Dynamique des fluides

3.1. Écoulement à faible nombre de Reynolds

Chute d'une bille dans une colonne de glycérine, vérification de la loi de Stokes qui prédit :

$$V_{\text{lim}} = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_f) g R^2}{\eta}$$

Pour des billes de rayons différents, filmer leur chute à l'aide d'une webcam et relever les positions au cours du temps (logiciel Cinéris). Ajuster la position en fonction du temps lorsque la vitesse limite est atteinte - on a alors $h(t) = h_0 - V_{\text{lim}} \times t$ - et évaluer cette dernière.

Ajuster la courbe $R^2 = f(V_{\text{lim}})$ en déduire le coefficient de viscosité dynamique η , comparer à la valeur tabulée. Évaluer le nombre de Reynolds.

■ Hydrodynamique physique, Guyon – Hulin – Petit, EDP sciences, 2^{ème} édition, chapitre 8

3.2. Écoulement à grand nombre de Reynolds

3.2.1. Mesure de la vitesse d'un écoulement

Vérifier la validité de la relation de Bernoulli $\rho \frac{v^2}{2} + p = C_{\text{ste}}$ à l'aide d'un tube de Pitot, d'un manomètre différentiel et d'un anémomètre à fil chaud. En déduire que le tube de Pitot est un moyen de mesurer la vitesse d'un écoulement.

■ Hydrodynamique physique, Guyon – Hulin – Petit, EDP sciences, 2^{ème} édition, chapitre 5

3.2.2. Mesure de la portance d'une aile d'avion

Pour un angle faible et fixé entre l'écoulement et le profil d'une aile d'avion, mesurer la portance F exercée par un écoulement laminaire d'air de vitesse v . Évaluer le nombre de Reynolds.

Montrer que la relation $F_{\text{portance}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot \sin(\alpha) \cdot C_z(\alpha)$ est bien vérifié (notamment pour la dépendance en vitesse). La vitesse de l'écoulement est évaluée à l'aide d'un anémomètre classique ou à fil chaud ou encore un tube de Pitot.

■ Hydrodynamique physique, Guyon – Hulin – Petit, 2^{ème} édition, chapitre 9

3.2.3. Propagation d'ondes à l'interface d'un liquide

On se propose maintenant d'étudier la propagation d'ondes surfaciques à l'interface entre l'eau et l'air. Pour cela on utilise une cuve à onde. Pour chaque valeur de la fréquence d'excitation, mesurer la longueur d'onde des ondes à la surface de l'eau. Ajuster par la formule théorique :

$$\omega^2 = th(k \cdot h) \times \left(g \cdot k + \frac{\gamma \cdot k^3}{\rho} \right)$$

h est la hauteur d'eau, γ le coefficient de tension superficielle air-eau et ρ la masse volumique de

l'eau.

☺ Il faut contraindre la valeur de g à $9,81 \text{ N/m}$ dans la formule.

☺ Comme $k.h$ est grand, $\text{th}(k.h) \sim 1$ ce qui simplifie la formule.

■ Hydrodynamique physique, Guyon – Hulin – Petit, EDP sciences, 2^{ème} édition, chapitre 6

■ Notice de la cuve à onde n°614

■ CRC Handbook 83^{ème} édition (pour la valeur de γ)

4. Montage n°4 : Capteurs de grandeurs mécaniques

Les capteurs permettent de convertir une grandeur à laquelle on souhaite accéder en une grandeur facilement mesurable. Pour cela ils sont constitués d'un transducteur au moins. Les grandeurs mécanique auxquelles on souhaite accéder peuvent être une position, une vitesse ou encore une force. La grandeur de sortie peut être une tension, une fréquence ou encore une capacité.

4.1. Capteur de position

Un capteur capacitif permet de remonter à une hauteur d'eau par exemple *via* une variation de capacité. Il est constitué de deux armatures métalliques dont l'une est vernie et isolée. L'autre est directement en contact avec le liquide.

Établir expérimentalement le diagramme de Bode du capteur et remarquer que le dispositif a un comportement purement capacitif (pente de -20dB/décade) sur une large gamme de fréquence.

Régler le LCR-mètre sur une fréquence à laquelle le capteur a une impédance capacitive. Mesurer la capacité en fonction de la profondeur d'immersion dans l'eau.

⚠ Ne pas oublier de relier les masses des câbles bananes-bananes à la borne guard du LCR-mètre. Cela permet d'annuler la capacité due aux câbles.

Conclure que ce dispositif constitue un capteur qui permet de mesurer une hauteur de liquide avec une réponse linéaire.

■ Notice du capteur capacitif n°197

4.2. Capteurs de vitesse

4.2.1. Mesure de la vitesse d'un objet

On montre le principe du radar. Une onde est émise à l'aide d'un émetteur ultrason puis captée, après réflexion sur un objet métallique en translation à la vitesse v , par un récepteur piézoélectrique. La translation rectiligne uniforme de l'objet est obtenue en plaçant ce dernier sur une table traçante. Les signaux incident et réfléchi sont multipliés aux bornes d'un multiplieur analogique et le signal de sortie est visualisé sur un oscilloscope. La fréquence des battements observés est $\Delta f = f_2 - f_1$. Pour plusieurs valeurs de v tracer $\Delta f = g(v)$. La théorie

prévoit $|f_2 - f_1| = f_1 \times v/c$. Conclure que le dispositif est un capteur de vitesse de réponse linéaire.

- Bulletin de l'union des physiciens n°804

4.2.2. Mesure de la vitesse d'un écoulement

Vérifier la validité de la relation de Bernoulli $\rho \frac{v^2}{2} + p = Cste$ à l'aide d'un tube de Pitot, d'un manomètre différentiel et d'un anémomètre à fil chaud. En déduire que le tube de Pitot est un moyen de mesurer la vitesse d'un écoulement, c'est un capteur de vitesse.

- Hydrodynamique physique, Guyon – Hulin – Petit, EDP sciences, 2^{ème} édition, chapitre 5

4.3. Capteur de contrainte

La jauge de contrainte est constituée d'un fil dont la résistance R varie en fonction de l'élongation Δl due à une contrainte exercée par une force. Déterminer la réponse $R = f(\Delta l)$ d'une jauge de contrainte. La loi attendue est linéaire. Déduire de la pente, la valeur du facteur de jauge, comparer à la valeur donnée par le constructeur.

Conclure que la jauge de contrainte est un capteur linéaire de force sur une petite gamme et que la sensibilité est d'autant meilleur que le facteur de jauge est grand.

- Expériences d'électronique, Duffait, chapitre 5 - Capteurs
- Notice de la jauge de contrainte n°542

5. Montage n°5 : Mesure de température

L'échelle internationale de température, l'EIT-90, définit, suivant la gamme de température, des thermomètres de référence (à pression de vapeur saturante, à gaz, à résistance de platine et pyrométrique). Dans ce montage on illustre le principe de fonctionnement de ces thermomètres.

- CRC Handbook (83^{ème} édition) – EIT (Description complète de l'EIT-90)

5.1. Mesure des basses températures

Pour la mesure de basses températures, dans l'EIT-90, on utilise un thermomètre à gaz contenant d'hélium 3 ou 4. La loi de correspondance pression-température permet de calculer la température connaissant la pression. On illustre dans cette expérience le fonctionnement d'un tel thermomètre contenant de l'air. La relation entre la température et la pression est donnée par la loi des gaz parfaits : $PV = nRT$. On étalonne le thermomètre à l'aide d'un point : la température de fusion de la glace. On plonge ensuite le ballon dans de l'eau bouillante on mesure la pression et on en déduit la température que l'on compare à la valeur tabulée dans un Handbook.

▲ La température d'ébullition de l'eau dépend de la pression. Il faut en tenir compte.

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique, « Thermométrie » et « Échelles thermométriques »

5.2. Mesures de température intermédiaires

5.2.1. Construction d'une échelle de température

Dans l'EIT-90 la mesure de températures intermédiaires se fait à l'aide d'une résistance de platine étalonnée grâce à plusieurs points fixes. On illustre le principe de l'étalonnage d'une telle résistance à l'aide du point triple de l'azote, de la température de fusion de l'eau et des températures d'ébullition de l'azote et de l'eau.

⚠ Il faut tenir compte de la dépendance en pression des températures d'ébullition.

La résistance est mesurée par la méthode à quatre points. On en déduit la relation résistance-température que l'on compare à la fonction donnée dans la notice. La sensibilité est définie par $\eta = 1/R \cdot dR/dT$, l'évaluer à une température usuelle.

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique, « Thermométrie »

5.2.2. Application : étalonnage d'une thermistance

À l'aide de la résistance de platine on étalonne une thermistance à coefficient de température négatif (CTN), on détermine les coefficients de la loi $R = R_0 e^{\alpha(1/T_0 - 1/T)}$. Pour cela ajuster $\ln(R/R_0) = f(1/T)$. T est mesurée à l'aide d'un thermocouple. Comparer les valeurs de α et R_0 à celles de la notice. En déduire la sensibilité $\eta = 1/R \cdot dR/dT = \alpha/T^2$. La thermistance est plus sensible à basse température. Évaluer cette sensibilité à une température usuelle.

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique, « Thermométrie »
- Expériences d'électronique, Duffait, chapitre 5 - Capteurs

5.3. Mesure des hautes températures

On détermine la réponse d'une photopile. Pour cela on l'expose au rayonnement d'un objet métallique placé dans un four et chauffé à plusieurs centaines de degrés. La température de l'objet est mesurée à l'aide d'un thermocouple. On ajustera la réponse de la photodiode par la loi suivante : $U = \alpha(T^4 - T_0^4)$. Connaissant α on est en mesure de mesurer la température d'un corps chaud qui se comporte comme un corps noir et le tout sans contact.

- Notice de la thermopile de Moll n°80
- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique, « Moll (thermopile de) »

6. Montage n°6 : Transitions de phase

On classe les transitions de phase suivant leur ordre. Une transition de phase du premier ordre se caractérise par la discontinuité d'au moins une dérivée première de l'enthalpie libre par

rapport à une variable d'état. Pour une transition de phase du deuxième ordre il y a continuité de ces dérivées premières mais discontinuité d'une dérivée seconde au moins.

6.1. Transition de phase d'ordre 1

6.1.1. Mesure d'une chaleur latente de changement d'état

Dans le cas de la vaporisation de l'azote, la discontinuité des dérivées premières de l'enthalpie libre est caractérisée par la chaleur latente de vaporisation L_{vap} . On mesure la chaleur latente de vaporisation de l'azote à l'aide d'un thermoplongeur alimenté avec une puissance électrique P . Il est plongé dans un Dewar contenant de l'azote liquide. La masse dm d'azote évaporées pendant dt (mesurée à l'aide d'une balance en présence (1) puis en l'absence (2) de chauffage) permet de calculer L_{vap} via la formule $L_{vap} = P / (dm_1/dt_1 - dm_2/dt_2)$. Comparer à la valeur tabulée.

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique, « Calorimétrie »
- CRC Handbook 83^{ème} édition (pour la valeur de m_{mol})

6.1.2. Température de changement d'état

On étudie la température de changement d'état de l'étain. Faire fondre de l'étain dans un creuset à l'aide d'un bec-meecker. Plonger un thermocouple dedans et relever la température mesurée au cours du temps. Constater que lorsque deux phases coexistent, le changement d'état se fait à température constante. Relever la valeur de cette température et comparer à la valeur tabulée.

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique, « fusion-solidification » (adaptation)
- CRC Handbook 83^{ème} édition (pour la valeur de T_{fusion})

6.1.3. Point triple

On obtient le point triple de l'azote à l'aide d'une pompe et d'un Dewar placé sous une cloche à vide. Un manomètre permet de mesurer la pression et une résistance de platine permet de mesurer la température (méthode à 4 points).

Lors du pompage on se déplace le long de la courbe $p(T)$ qui caractérise l'équilibre liquide-vapeur, la variance vaut 1. Lorsqu'on arrive au point triple, la variance est nulle, il y a coexistence des trois phases liquide-solide-vapeur. Relever la valeur de la pression et de la température, comparer à la valeur tabulée.

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique, « Point triple » (adaptation)
- CRC Handbook 83^{ème} édition (pour les valeurs de P_{triple} et T_{triple})

6.2. Transitions de phase d'ordre 2



6.2.1. Transition liquide/gaz → fluide supercritique

La transition de la phase liquide/gaz vers l'état fluide supercritique se fait de manière continue. Les volumes massiques tendent vers une valeur commune et la chaleur latente de changement d'état s'annule une fois la température/pression critique atteintes. On met en évidence cette transition à l'aide d'une cellule dédiée contenant du SF₆. La densité de SF₆ dans la cellule est étudiée de sorte à obtenir une valeur de pression égale à la pression critique lorsque la température critique est atteinte. La cellule est chauffée à l'aide d'un bain thermostaté ou d'un sèche cheveux. On forme l'image en strioscopie de la cellule sur un écran et on observe le phénomène d'opalescence critique au voisinage de la transition de phase. Évaluer à quelques °C près la température critique à l'aide d'un thermomètre, comparer rapidement à la valeur tabulée.

- Notice de la cellule dédiée n°432

6.2.2. Transition ferromagnétique → paramagnétique du fer

On évalue la température de transition ferromagnétique → paramagnétique du fer dite température de Curie. Pour ce faire on approche un aimant d'un morceau de fer en contact avec un thermocouple. Les deux objets (aimant et morceau de fer) sont isolés thermiquement par un plaque ignifugée. Le morceau de fer est chauffé à l'aide d'un bec-meeker jusqu'à ce que l'aimant se décolle du fer. On a alors atteint la température de transition. Relever la température indiquée par le thermocouple, comparer à la valeur tabulée.

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique, « Transitions de phase »
- CRC Handbook 83^{ème} édition (pour la valeur de T_{curie})

7. Montage n°7 : Instruments d'optiques

7.1. Étude détaillée du microscope

On utilise un microscope dont on peut démonter l'oculaire et l'objectif. Nous allons étudier d'abord séparément ces deux éléments puis le dispositif dans son ensemble.

7.1.1. Étude de l'objectif

On mesure la distance focale f de l'objectif en faisant l'image d'une mire de microscope sur un écran à travers celui-ci. On en déduit le grandissement de l'objectif $\gamma = \Delta/f$ où Δ est la distance entre le foyer image de l'objectif et l'image intermédiaire. Comparer à la valeur gravée sur l'objectif.

On peut également déterminer l'ouverture numérique en faisant l'image sur un écran d'un petit trou à travers l'objectif placé à la distance standard (150mm) du trou. En déduire l'angle d'ouverture puis l'ouverture numérique. Comparer à la valeur gravée sur l'objectif.

- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 1.10 – Application aux instruments d'optique réels



7.1.2. Étude de l'oculaire

Par la même méthode que pour l'objectif (mais en le retournant pour des raisons pratiques), déterminer la focale de l'oculaire. En déduire le grossissement commercial de l'oculaire :

$$G_c = D_{pp} / f \text{ avec } D_{pp} = 0,25m \text{ le « punctum remotum » de l'oeil.}$$

- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 1.10 – Application aux instruments d'optique réels

7.1.3. Étude globale

À l'aide des valeurs obtenues précédemment, calculer le grossissement total $G = G_c \times \gamma$. Le déterminer directement en faisant l'image d'une mire sur un écran à travers la totalité du microscope. L'angle β sous lequel on voit deux graduations de la mire distantes de d permet de calculer le grossissement $G = \beta * D_{pp} / d$. Enfin calculer G à l'aide des valeurs données par le constructeur (grandissement de l'objectif et grossissement de l'oculaire). Comparer les valeurs obtenues.

- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 1.10 – Application aux instruments d'optique réels

7.2. Diaphragme de champ et d'ouverture

Réaliser une lunette astronomique de Kepler (deux lentilles convergentes, la première de longue focale, la seconde de courte focale) accompagnée d'un objet à l'infini (objet matérialisé par un diaphragme éclairé et placé au foyer objet d'une lentille) et d'un œil fictif (lentille + écran au foyer image de cette dernière).

Placer un diaphragme au niveau de l'image intermédiaire. Constater que lorsqu'on ferme le diaphragme, la luminosité de l'image est inchangée mais le champ est limité. C'est un diaphragme de champ. Ensuite placer un diaphragme en entrée de la lunette (accollée à l'objectif). Constater que lorsqu'on ferme le diaphragme, le champ est inchangé mais la luminosité baisse. C'est un diaphragme d'ouverture. Le quantifier à l'aide d'un photodiode et montrer que la luminosité de l'image est une fonction linéaire de S où S est la surface du diaphragme d'ouverture (tracer $U_{\text{photodiode}} = f(\Phi_{\text{diaphragme}})$)

⚠ Il faut que l'éclairement soit homogène. Pour cela, placer un papier calque contre le diaphragme qui matérialise l'objet.

- Montages de physique (optique, mécanique, ...), Bellier, chapitre 6 – Instruments d'optique

7.3. Limitations des optiques

Mettre en évidence qualitativement les aberrations sphériques (en utilisant une grande lentille) et les aberrations chromatiques (en utilisant une lentille non corrigée).

- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 1.8 – Aberrations des lentilles sphériques

8. Montage n°8 : Interférences lumineuses

Sous certaines conditions dites « de cohérence », il est possible de faire interférer deux faisceaux lumineux de manière constructive ou destructive. Il existe deux moyens d'obtenir de tels faisceaux : la division de front d'onde et la division d'amplitude.

8.1. Interférences par division du front d'onde

On illustre le principe des interférences à division de front d'onde en utilisant deux fentes d'Young de largeur e écartées d'une distance a . Elles sont éclairées en incidence normale par une fente source de largeur réglable elle-même éclairée par une lampe à vapeur de mercure. On ajoute un filtre pour ne garder que le doublet jaune du mercure. La figure d'interférence est récupérée à l'aide d'une barrette CCD. Ajuster la figure obtenue à l'aide de la formule théorique :

$$I(x) = I_0 \text{sinc}^2(\pi bx / \lambda D) [1 + \gamma(e) \cos(2\pi ax / \lambda D)]$$

Remonter aux valeurs de e et de a , comparer aux valeurs attendues. Élargir la fente source et constater que le contraste se dégrade rapidement. On perd la cohérence spatiale.

☺ On peut simplifier cette expérience en utilisant un faisceau laser envoyé directement sur les fentes.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 3.2 – Interférences

8.2. Interférences à division d'amplitude, applications

8.2.1. Réglage d'un interféromètre de Michelson en lame d'air

D'abord à l'aide d'un laser puis à l'aide d'une lampe à vapeur de mercure haute pression (philora) régler la compensatrice et les miroirs de l'interféromètre de Michelson en configuration « lame d'air ». Observer la figure d'interférence (franges circulaires) sur un écran. Remarquer que l'interfrange dépend de la longueur d'onde.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 3.2 – Interférences

8.2.2. Application : spectroscopie en transformée de Fourier

Intercaler un filtre pour ne garder que le doublet jaune de la lampe à vapeur de mercure. Placer un photodiode au centre de la figure d'interférence et chariotter un miroir à l'aide d'un moteur de vitesse connue. Faire un enregistrement autour du contact optique et pour quelques fuseaux (le contraste s'annule à intervalles réguliers). À partir de cet enregistrement en déduire λ_{moyen} , $\Delta\lambda$ et évaluer la largeur des raies. La perte de contraste est due à la perte de cohérence spatiale lorsqu'on chariote trop.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 5.2 – Spectroscopes interférentiels

8.3. Interférences et polarisation



Fresnel et Arago ont montré que pour avoir des interférences entre deux ondes, il faut qu'elles aient la même polarisation. On illustre l'expérience d'Arago en insérant des polariseurs dans l'interféromètre de Michelson et en observant à quelles conditions on obtient des interférences.

⚠ La luminosité étant fortement dégradée par la présence de polariseurs, il est vivement conseillé de travailler avec un laser élargi pour gagner en luminosité

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 3.2 – Interférences

9. Montage n°9 : Diffraction des ondes lumineuses

La diffraction des ondes lumineuses ne devient significative que lorsque la taille des objets diffractants est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière utilisée. Cette diffraction est la manifestation du caractère ondulatoire de la lumière et possède un lien étroit avec le phénomène d'interférence.

9.1. Mise en évidence de la diffraction

On utilise une fine fente de largeur e connue éclairée en incidence normale par un laser. La figure de diffraction est observée dans les conditions de Fraunhofer (écran éloigné à une distance D). On observe alors des taches dues à la diffraction de la lumière par la fente. Capturer l'image de la figure de diffraction à l'aide d'une barrette CCD puis effectuer un ajustement à l'aide de la formule de Fraunhofer $I(x) = I_0 \text{sinc}^2(\pi ex / \lambda D)$. Comparer la valeur de la largeur de la fente issue de l'ajustement à celle attendue.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 3.1 – Diffraction

9.2. Diffraction par des motifs répétés

9.2.1. Cas des motifs ordonnés

Remplacer la fente précédente par $N=3$ fines fentes proches, puis 4, puis 5. Constater que les maxima secondaires sont atténués quand N augmente. On en compte $N-2$ entre deux maxima principaux. Expliquer alors l'intérêt du réseau qui permet, N étant très grand dans ce cas, de concentrer la lumière dans les maxima principaux.

Remplacer les fentes par un réseau et le laser par une lampe à vapeur de mercure et une lentille convenablement placée. Constater que le phénomène de diffraction dépend de la longueur d'onde de la lumière. À l'aide d'une barrette CCD tracer le graphe de la déviation x en fonction de la longueur d'onde (tabulées) des raies de la lampe. Constater que la loi $x = f(\lambda)$ est linéaire. Utiliser cette propriété pour déterminer la longueur d'onde du doublet du sodium. Le phénomène de diffraction peut être utilisé en spectroscopie.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 5.1 – Spectroscopie à fentes

9.2.2. Cas des motifs répartis de manière aléatoire

Utiliser un faisceau laser élargi pour éclairer une lame de microscope sur laquelle on a préalablement déposé des spores de lycopodes. Observer la tache d'Airy sur un écran (conditions de Fraunhofer). À l'aide de la formule donnant son rayon : $R = 1,22 \times \lambda D/a$ en déduire le rayon moyen des spores. Comparer à la valeur mesurée directement à l'aide d'un microscope muni d'une mire micrométrique.

- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 3.1 – Diffraction

9.3. Filtrage spatiale : expérience d'Abbe

On réalise une expérience de filtrage spatial. La source est une lampe quartz-iode. L'objet diffractant est une grille de faible pas. Le filtrage se fait dans le plan de Fourier (voir référence) à l'aide d'une fente orientable. Provisoirement on pourra projeter le plan de Fourier sur l'écran à l'aide d'une lentille. Constaté que suivant l'orientation de la fente, on arrive à filtrer les fréquences spatiales horizontales ou verticales.

⚠ Il faut absolument que le pas de la grille soit faible et quelle soit non diffusante.

- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 3.1 – Diffraction

10. Montage n°10 : Spectrométrie optique

La spectrométrie optique a pour but de mesurer des longueurs d'ondes. Pour cela on utilise un dispositif dispersif (prisme, réseau, ...) accompagné d'un détecteur (photodiode, CCD, ...). On distingue les spectroscopes à fente unique équipés d'un capteur d'image des spectroscopes à deux fentes équipés d'un capteur de flux et qui nécessitent un déplacement mécanique pour pouvoir balayer toutes les longueurs d'ondes. Enfin il est possible de faire de la spectrométrie par transformée de Fourier.

10.1. Principe d'un spectroscope à fente unique

On réalise un spectroscope à fente à l'aide d'une fente source dont on fait l'image sur une CCD linéaire. Un intercale un réseau entre les deux. Ce spectroscope est étalonné à l'aide d'une lampe à vapeur de mercure dont les raies sont connues. La loi $x = f(\lambda)$, x étant l'abscisse sur l'écran, est linéaire. On mesure ensuite le déplacement pour le doublet jaune du sodium et on en déduit la longueur d'onde correspondante à l'aide de la droite d'étalonnage.

⚠ Ne surtout pas déplacer la CCD entre l'étalonnage et la mesure. Pour cela, l'utilisation d'un banc d'optique est préconisée.

- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 5.1 – Spectroscopes à fente
- Notice de la CCD n°189
- Notice de la lampe spectrale n°102

10.2. Pouvoir de résolution d'un spectroscopie

Les spectroscopes à fentes sont limités en résolution à cause de la largeur des fentes qui doit être suffisante de manière à avoir un signal significatif en sortie.

On utilise un monochromateur à deux fentes muni d'un moteur permettant d'effectuer un balayage en longueur d'onde. La source de lumière est une lampe philora (vapeur de mercure haute pression) accompagnée d'un filtre permettant d'isoler la raie verte. En sortie on accole un photomultiplicateur relié à un dispositif d'acquisition informatique. Effectuer une acquisition sur la totalité de la largeur de la raie verte pour les différents jeux de fentes du monochromateur. En ajustant les courbes (ce sont des gaussiennes à cause de l'effet Doppler), montrer que leur largeur est proportionnelle à la largeur des fentes utilisées. Comparer la valeur de la pente avec la valeur du coefficient de dispersion réciproque donnée dans la notice.

⚠ Le photomultiplicateur est un instrument très sensible, il faut à tout prix éviter les lumières parasites.

- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 5.1 – Spectroscopes à fente
- Notice du monochromateur n°328

10.3. Application : série de Balmer de l'hydrogène

À l'aide d'un spectroscopie USB relié à un ordinateur faire le spectre d'une lampe à hydrogène. En fait c'est la version compacte des instruments utilisés précédemment. Le rôle de la fente est joué par la fibre optique et le capteur est une CCD linéaire.

Relever la longueur d'onde des raies indicées par n correspondant à la série de Balmer (attention aux raies parasites). Tracer $1/\lambda_n^2 = f(1/n^2)$. La relation de Ritz donne la relation $1/\lambda_n^2 = R_y * (1/2^2 - 1/n^2)$. De la valeur de la pente, en déduire la valeur du Rydberg R_y . Comparer à la valeur tabulée.

- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 5.1 – Spectroscopes à fente
- Notice de la lampe Balmer n°431

10.4. Spectrométrie par transformée de Fourier

La spectrométrie interférentielle par transformée de Fourier est une méthode extrêmement précise. On l'applique à la détermination de la longueur d'onde centrale $\bar{\lambda}$ du doublet jaune du mercure (utiliser un filtre pour isoler ce doublet), de l'écart $\Delta\lambda$ entre les raies du doublet et même de la largeur $\delta\lambda$ des raies du doublet. On met en œuvre cette méthode à l'aide d'un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air. À l'aide d'un chariotage motorisé et d'une photodiode, effectuer un enregistrement. La fréquence la plus élevée permet de déterminer $\bar{\lambda}$. La fréquence des battements permet de calculer $\Delta\lambda$. Enfin la décroissance exponentielle du

contraste (perte de cohérence spatiale) permet d'évaluer $\delta\lambda$.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 5.2 – Spectroscopes interférentiels

11. Montage n°11 : Émission et absorption de la lumière

11.1. Émission spontanée de la lumière

Étude du spectre de raie de l'hydrogène (série de Balmer) à l'aide d'un goniomètre muni d'un réseau. Le réseau est utilisé soit au minimum de déviation soit en incidence normale. On vérifie la formule de Ritz :

$$\frac{1}{\lambda} = R_y \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Tracer $1/\lambda = f(1/n^2)$. La pente correspond à $-R_y$. Comparer à la valeur tabulée.

☉ On peut vérifier que l'ordonnée à l'origine est proche de $R_y/4$.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 5.1 – Spectroscopes à fentes

■ Physique Tout-en-un PC/PC*, Sanz, TP-cours sur le goniomètre (pour le réglage)

■ Notice de la lampe Balmer n°431

11.2. Absorption de la lumière et énergie de gap : étude du phosphore de gallium GaP

Un lame de phosphore de gallium est éclairée en lumière blanche. A l'aide d'un spectroscope USB on obtient le spectre blanc, le spectre noir et le spectre en transmission. On en déduit le spectre d'absorbance $A = f(\lambda)$. Les photons dont l'énergie est supérieure à l'énergie de gap sont absorbés. Pour des énergies inférieures, le milieu est transparent. Évaluer l'énergie du gap en électron-volt et comparer à la valeur tabulée.

■ Physique de l'état solide, Kittel, chapitre 8 (valeur tabulée et principe de l'expérience)

11.3. Spectre d'absorption et d'émission d'un colorant organique : la rhodamine 610

À l'aide d'un prisme à vision direct puis d'un spectroscope USB établir le spectre d'absorption de la rhodamine 610, celle-ci étant éclairée en lumière blanche. Faire le lien entre les longueurs d'ondes absorbées et la couleur de la rhodamine.

Établir ensuite le spectre en émission de la rhodamine en l'excitant à l'aide d'une lampe à vapeur de mercure et en ne gardant que la raie verte du spectre (filtre interférentiel). La fibre optique du spectroscope est placée sur le côté de la cuve. Vérifier que la raie verte du mercure est bien dans la bande d'absorption de la rhodamine. Vérifier que l'émission se fait à des longueurs d'ondes plus élevées (énergie plus faible) que l'absorption.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 5.1 – Spectroscopes à fentes

11.4. Application : Dosage par spectrophotométrie



La loi de Beer-Lambert prévoit une relation linéaire entre la concentration c d'une espèce colorée en solution et l'absorption A de cette solution.

La loi est :

$$A_\lambda = \log\left(\frac{I_e}{I_{s,\lambda}}\right) = \epsilon_\lambda \times l \times c .$$

l est la longueur de solution traversée et ϵ_λ le coefficient d'absorption molaire.

Vérifier la validité de cette loi à l'aide d'une échelle de concentration de solutions de permanganate de potassium KMnO_4 . Utiliser pour cela un spectrophotomètre. Tracer $A_\lambda = f_\lambda(c)$ choisir λ de manière à avoir une absorption significative (on pourra préalablement tracer $A = f(\lambda)$).

12. Montage n°12 : Photorécepteurs

L'œil est un capteur relativement sensible dans le visible (~400 à 800nm). Cependant il ne permet pas de quantifier le flux lumineux reçu et sa gamme de sensibilité est limitée. Il est donc nécessaire de recourir à des photorécepteurs. Ces derniers doivent être optimisés pour l'usage qu'on en fait.

12.1. La photodiode

La photodiode est largement utilisée dans le domaine de l'optique. On cherche à caractériser ce composant.

12.1.1. Caractéristique

Sur un oscilloscope, tracer la caractéristique d'une photodiode en série avec une résistance, utiliser pour cela un générateur basse fréquence. Montrer qualitativement que le courant inverse augmente quand l'intensité lumineuse augmente.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 2.2 – Photodiode et 2.4 – Détecteurs thermiques

12.1.2. Linéarité

Polariser la photodiode en inverse et à l'aide de deux polariseurs et d'un laser, connaissant la loi de Malus : $I = I_0 \cos^2(\theta)$, vérifier que le courant inverse est proportionnel à l'intensité lumineuse reçue.

■ Expériences d'électronique, Duffait, Chapitre 4 - Composants

12.1.3. Réponse spectrale

En s'aidant d'un pyromètre optique (réponse spectrale plate) et d'un monochromateur, tracer la courbe de réponse spectrale de la photodiode. On attend un maximum de sensibilité dans l'infrarouge. À l'aide d'un LASER, d'un luxmètre, d'un ampèremètre et d'un voltmètre, évaluer le

rendement quantique de la photodiode à 632,8 nm (on trouve typiquement quelques dizaines de %).

- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 2.2 – Photodiode et 2.4 – Détecteurs thermiques

12.1.4. Temps de réponse

Alimenter une DEL par un signal numérique (sortie TTL d'un GBF par exemple). Faire passer ce signal dans une fibre optique (optionnel) et le détecter à l'aide d'une photodiode polarisée en inverse en série avec une résistance. On étudie le temps de réponse du dispositif en fonction de la résistance. Montrer que le temps de réponse est limité par les effets capacitifs dans la photodiode pour R assez grand ($\tau=RC_{\text{photodiode}}$, comparer à la valeur de $C_{\text{photodiode}}$ de la notice) et par le temps de réponse de la DEL pour les valeurs de R faibles.

- Notice de la photodiode n°602
- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 2.2 – Photodiode

12.2. Utilisation d'un détecteur thermique

On réalise un corps noir (en première approximation) à l'aide d'un four contenant un corps métallique que l'on peut chauffer à plusieurs centaines de degrés. On y accole un diaphragme refroidi par eau. Le rayonnement émis est capté à l'aide d'une thermopile de Moll reliée à un millivoltmètre. On suppose connue la loi de Stefan-Boltzman ($P_s=\sigma.T^4$). Montrer que la tension délivrée par la thermopile est une fonction linéaire de la puissance reçue.

Facultatif : À l'aide d'une diode électroluminescence alimentée par un créneau de basse fréquence (0,5Hz), et d'une thermopile de Moll reliée à un oscilloscope, déterminer le temps de réponse de cette dernière. Comparer à la valeur de la notice.

- Notice de la thermopile de Moll n°80
- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 2.4 – Détecteurs thermiques

12.3. Application : production d'énergie

Étude d'une cellule photovoltaïque à base de silicium polycristallin. Détermination rapidement la charge nominale donnée par $R_{th}=V_{co}/I_{cc}$. En éclairant la photopile à l'aide d'une lampe quartz-halogène, déterminer la puissance P en sortie en régime nominal. Remplacer la photopile par une thermopile de Moll placée exactement au même endroit et déterminer le flux lumineux surfacique $P_s=P/S_{\text{thermopile}}$. En déduire le flux lumineux total reçu par la photopile $P_{tot}=P_s*S_{\text{photopile}}$. Enfin calculer le rendement $\eta=P/P_{tot}$ (typiquement ~20%).

- Notice de la thermopile de Moll n°80
- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 2.4 – Détecteurs thermiques

13. Montage n°13 : Biréfringence, pouvoir rotatoire

La biréfringence se caractérise par la présence d'axes privilégiés d'indices optiques différents au sein d'un matériaux. La biréfringence est caractérisée par la quantité $\Delta n = n_e - n_o$, entre les indices ordinaire et extraordinaire.

Le pouvoir rotatoire, lui, est dû à la présence d'indices différents selon la polarisation de l'onde incidente (décomposée sur la base circulaire droite/gauche). Il se caractérise par la rotation d'un angle β de la polarisation de l'onde incidente.

13.1. Biréfringence naturelle, caractérisation et mesure

Le spath d'Islande est un matériaux biréfringent. Le mettre en évidence en faisant l'image d'un diaphragme en forme de F sur un écran et en intercalant un bloc de spath. En tournant le spath, montrer qu'il existe bien un rayon ordinaire et un autre extraordinaire.

Faire passer un fin faisceau de lumière parallèle à travers de spath en mesurant la distance entre les deux images (connaissant l'angle que font les lignes neutres avec le dioptré), évaluer la biréfringence du spath.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 6.3 – Milieux biréfringents cristallins

13.2. Biréfringence et polarisation

Une lame biréfringente associée à des polariseurs convenablement orientés permet d'obtenir un spectre cannelé. Ce dernier permet de caractériser la lame.

En lumière blanche, former l'image d'une fente sur un écran. Intercaler deux polariseurs croisés (extinction). Entre ces deux polariseurs insérer la lame biréfringente à étudiées à 45° , elle doit avoir son axe optique parallèle à ses faces. Le blanc obtenu sur l'écran ne contient pas toutes les longueurs d'onde. L'analyser à l'aide d'un spectroscopie USB. Le spectre obtenu est qualifié de « cannelé ». En comptant le nombre p de franges entre deux longueurs d'ondes précises λ_1 et λ_2 , connaissant l'épaisseur e de la lame, on peut en déduire $\Delta n = p \lambda_1 \lambda_2 / e (\lambda_1 - \lambda_2)$.

☺ La formule est démontrée dans Optique, Bruhat, chapitre 6, section 78

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 6.3 – Milieux biréfringents cristallins

13.3. Pouvoir rotatoire naturel

À l'aide de lames de quartz (perpendiculaire), on met en évidence l'activité optique de ce matériau. Tester la validité de la loi de Biot en intercalant des lames d'épaisseurs d différentes entre un polariseur et un analyseur. La pente de la droite $\beta = f(d)$ donne le coefficient d'activité optique du quartz. Comparer à la valeur tabulée.

En utilisant plusieurs filtres interférentiels, montrer l'influence de la longueur d'onde sur le

pouvoir rotatoire en traçant $\beta=f(1/\lambda^2)$ la loi attendue est linéaire.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 6.6 – Activité optique

13.4. Polarisation induite : effet Faraday

Les lasers supportent très mal les retours de lumière par réflexion. Pour éviter ce problème on utilise des isolateurs optiques. Problème : l'effet d'un matériau naturellement actif sur la polarisation d'une onde réfléchie (aller+retour) est globalement nulle. On ne peut pas utiliser ces matériaux pour faire un isolateur. Pour cela il faut utiliser le pouvoir rotatoire induit par effet Faraday.

Utiliser un bloc épais de flint lourd et le placer dans l'entrefer d'un électroaimant. À l'aide d'un laser polarisé et d'un analyseur et d'un photodiode, mesurer le pouvoir rotatoire du matériau en fonction de l'intensité du champ magnétique B . Tracer $\beta=f(B)$. La pente (à un facteur multiplicatif près) permet de remonter à la constante de Verdet V du flint qui intervient dans la relation $\beta=V \cdot B \cdot d$. Comparer à la valeur tabulée.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 6.6 – Activité optique

14. Montage n°14 : Polarisation des ondes électromagnétiques

Certains phénomènes ne peuvent être expliqués à l'aide d'un modèle scalaire de la lumière. Il faut, pour les expliquer, introduire la notion de direction de polarisation.

14.1. Production et analyse des ondes polarisées rectilignement

14.1.1. Polarisation des ondes centimétriques

On produit des ondes centimétriques à l'aide d'une diode gunn. La polarisation de ces ondes est obtenue à l'aide d'un polariseur à grille métallique. L'intensité de l'onde en sortie du dispositif est mesurée à l'aide d'un récepteur relié à un voltmètre. Faire varier l'angle θ du polariseur par rapport à l'horizontale et tracer la courbe $V_{intensité}=f(\theta)$. Conclure que l'onde initial était polarisée rectilignement et vérifier la validité de la loi de Malus.

☺ Il est possible qu'en réalité l'onde en sortie ne soit que partiellement polarisée.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 6.2 – Production de lumière polarisée

14.1.2. Polarisation par réflexion vitreuse

Déterminer l'angle de Brewster i_B d'un diélectrique. Pour cela former un faisceau de lumière blanche collimaté, polarisé horizontalement et filtré avec un filtre interférentiel. Déterminer l'intensité lumineuse en sortie soit à l'œil soit avec une photodiode.

Préalablement, le diélectrique est orienté perpendiculairement au faisceau par autocollimation et l'angle de rotation est déterminé à l'aide d'une monture comportant un cercle gradué.

☺ La méthode à l'œil s'avère très précise si on regarde la réflexion du filament sur le diélectrique. Attention cependant à ne l'utiliser que près de l'incidence de Brewster (intensité en sortie faible) sous peine d'être ébloui.

⚠ Si jamais vous remplacez la source blanche pas un LASER il va sans dire que la méthode à l'œil est à proscrire

À partir de la valeur de l'angle i_B obtenu, en déduire l'indice optique n du diélectrique donnée par $n = \tan(i_B)$. Constaté que lorsque l'angle de polarisation initial n'est pas horizontale, la polarisation après réflexion est purement rectiligne et verticale.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 6.2 – Production de lumière polarisée

14.2. Production et analyse d'autres formes de polarisation

14.2.1. Action des milieux biréfringents

On étudie l'action de lames biréfringentes taillées parallèlement à l'axe optique. On se limite à l'action des lames $\lambda/2$ et $\lambda/4$. On utilise un filtre interférentiel pour se placer à la longueur d'onde de fonctionnement des lames minces. Étudier, à l'aide d'un polariseur tournant, l'action des lames sur une polarisation rectiligne. Conclure qu'une telle lame possède deux axes neutres formant un angle de 90° entre eux et qu'elles transforment une polarisation rectiligne en polarisation rectiligne, circulaire ou elliptique suivant l'angle entre les axes neutres et la polarisation incidente.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 6.3 – Milieux biréfringents cristallins

14.2.2. Analyse d'une onde polarisée elliptiquement

On étudie la polarisation d'un faisceau de lumière parallèle après réflexion sur une surface métallique. La surface métallique est un miroir aluminé sur la face avant. La polarisation en sortie est analysée par deux moyens.

Tout d'abord on utilise un polariseur tournant et une photodiode. Le degré d'ellipticité est donné par la relation $\eta = \sqrt{V_{min}/V_{max}}$. Ensuite on utilise un second polariseur placé selon le petit axe de l'ellipse (minimum de luminosité). Ajouter une lame $\lambda/4$, son axe lent étant dirigé suivant ce même axe. La polarisation après celle-ci est maintenant rectiligne. Tourner le second polariseur d'un angle $\alpha < 90^\circ$ de manière à obtenir une extinction totale. Déterminer $\eta = \tan(\alpha)$.

Comparer les deux valeurs obtenues.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 6.4 – Analyse d'une lumière polarisée

15. Montage n°15 : Production et mesure de champs magnétiques

Les champs magnétiques sont utilisés dans de nombreux domaines tels que l'imagerie médicale

ou la transformation de puissance. Ils sont également présents naturellement (matériaux aimantés, champ magnétique terrestre). Comment peut-on mesurer ces champs magnétiques et comment sont-ils produits ?

15.1. Mesure des champs magnétiques

La loi de Faraday stipule que dans un circuit électrique, la variation de flux magnétique induit une force électromotrice selon la loi : $e = -d\Phi/dt$. En intégrant cette force électromotrice et en divisant par la surface du circuit, on remonte à la valeur du champ magnétique. C'est le principe du flux-mètre. On utilise ce dernier pour caractériser l'effet Hall dans un semi-conducteur dopé soumis à un champ magnétique. Le champ magnétique est créé par un électroaimant et on mesure la tension Hall $V_H = f(B)$. Vérifier que le coefficient de la droite obtenue est en accord avec la valeur de la densité de porteurs de charges extrinsèques. On dispose donc d'un capteur dont la réponse est linéaire vis à vis de l'intensité du champ magnétique.

- Notice des plaquettes de semi-conducteurs n-Ge et p-Ge (n°535)
- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, Électricité, « Conduction »

15.2. Production de champs magnétiques

La production de champs magnétiques peut se faire de deux manières. Via des aimants permanents (illustrer cette possibilité à l'aide d'un aimant droit et d'une plaquette de mini-boussoles) et via la circulation de courants électriques.

On étudie cette deuxième possibilité à l'aide de bobines de Helmholtz. À l'aide d'un teslamètre à effet Hall et d'une table traçante (ou manuellement) mesurer le champ magnétique créé le long de l'axe de deux bobines en configuration quelconque, de Helmholtz et anti-Helmholtz. Ajuster la courbe obtenue par la loi théorique attendue. Le faire pour différentes valeurs de l'intensité et montrer que le champ varie linéairement en fonction de l'intensité. Les bobines en configuration de Helmholtz constituent un bon moyen d'obtenir un champ magnétique constant sur un petit espace. La configuration anti-Helmholtz est utilisée dans les IRM pour créer un gradient de champ magnétique constant.

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, Électricité, « Magnétostatique »

15.3. Mesure d'un champ magnétique naturel

On se propose d'évaluer la valeur de la composante horizontale du champ magnétique terrestre à l'aide d'une boussole dite « des tangentes ». Pour cela on soumet la boussole au champ magnétique terrestre B_T et à un champ magnétique orthogonal de valeur connue B_0 obtenu grâce à un courant circulant dans des spires. En inversant le sens du courant dans les spires, mesurer

l'angle de déviation 2α de la boussole pour différentes valeurs de B_0 . En traçant $B_0=f(\tan\alpha)$ en déduire la valeur de B_T (pente de la droite).

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, Électricité, « Boussoles »

16. Montage n°16 : Milieux magnétiques

Si on plonge des matériaux comportant un moment magnétique dans un champ magnétique, on observe plusieurs effets. On peut caractériser ces réactions à l'aide de la susceptibilité magnétique χ . Les matériaux diamagnétiques, génèrent en réaction, une aimantation opposée de faible intensité ($\chi < 0$ et faible). Les matériaux paramagnétiques, eux, génèrent une aimantation de même sens ($\chi > 0$). Enfin les ferromagnétiques génèrent une aimantation de même sens et parfois d'intensité élevée ($\chi \gg 0$).

16.1. Les différents comportements

Utiliser des petits barreaux de bismuth et d'aluminium. Montrer qu'un fois soumis à un champ magnétique (utiliser un aimant permanent puissant), ils s'orientent différemment suivant leur caractère paramagnétique ou diamagnétique.

Le barreau de bismuth, diamagnétique, se place suivant les lignes de champ décroissants. C'est le contraire pour l'aluminium.

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, L'électricité, « Paramagnétisme » et « Diamagnétisme »

16.2. Les milieux paramagnétiques

À l'aide d'un tube en U contenant du chlorure de fer III (FeCl_3) et d'un électroaimant, on mesure la susceptibilité paramagnétique de ce composé. En effet lorsqu'on applique un champ magnétique B au niveau d'une des interfaces, le liquide s'élève d'une hauteur h et on a la relation suivante : $\chi = 2 \cdot \mu_0 \cdot \rho \cdot g \cdot h / B^2$. La hauteur h est mesurée précisément en projetant l'image de l'interface sur un écran à l'aide d'une lentille.

☺ L'utilisation d'un webcam peut permettre d'obtenir des mesures plus précises.

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, L'électricité, « Paramagnétisme »

16.3. Les milieux ferromagnétiques

16.3.1. Comportement vis à vis d'une excitation magnétique

En utilisant une résistance et un intégrateur, on peut tracer le graphique $B=f(H)$ d'un transformateur, construit avec un noyau de fer et deux bobines de 250 spires, sur un oscilloscope en mode XY. En procédant avec une tension continue croissante on peut tracer la courbe de première aimantation. Avec une tension alternative, on peut tracer le cycle d'hystérésis.

Connaissant la relation de proportionnalité entre les tensions mesurées, H et B, on peut évaluer le champ à saturation, le champ rémanent, l'excitation coercitive et la valeur maximale de μ_r . Comparer aux valeurs typiques pour un noyau de fer.

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, L'électricité, « Transformateur »
- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, L'électricité, « Ferromagnétisme »

16.3.2. Comportement vis à vis de la température

On approche un aimant d'un morceau de fer en contact avec un thermocouple. Les deux objets (aimant et morceau de fer) sont isolés thermiquement par un plaque ignifugée. Le morceau de fer est chauffé à l'aide d'un bec-meeker jusqu'à ce que l'aimant se décolle du fer. On a alors atteint la température de transition. Relever la température indiquée par le thermocouple, comparer à la valeur tabulée. Cette température est appelée température de Curie. Quand le corps initialement ferromagnétique est chauffé au-delà de cette température, il devient paramagnétique.

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique, « Transitions de phase »
- CRC Handbook 83^{ème} édition (pour la valeur de T_{curie})

17. Montage n°17 : Métaux

Les métaux sont de bons conducteurs électriques et thermiques. Cela suggère qu'une même propriété est à l'origine des deux types de conceptions. En effet dans les deux cas les transferts électriques/thermiques se font par l'intermédiaire des électrons.

17.1. Propriétés électriques

Via une mesure à 4 points mesurer la conductivité électrique d'un enroulement de cuivre de section S et de longueur L, plongé dans un bain thermostaté. La mesure simultanée de la tension et de l'intensité permet de remonter à la résistance et d'en déduire la conductivité $\sigma = L/RS$. Étudier la relation (affine) entre la résistivité et la température, en déduire le coefficient de Matthiessen α du cuivre, comparer à la valeur tabulée.

- CRC Handbook 83^{ème} édition (pour les valeurs de σ et α)

17.2. Propriétés thermiques

Un barreau de cuivre est chauffé à l'une de ses extrémités par une résistance (résistance R, tension U). L'autre extrémité est refroidie par un flux d'eau continu. Deux thermocouples éloignés d'une distance d permettent de mesurer la différence de température ΔT entre les deux extrémités. On peut alors remonter à la conductivité thermique λ du cuivre via la relation suivante : $\lambda = d \cdot U^2 / R \cdot S \cdot \Delta T$. Faire cette étude pour différentes valeurs de U et donc de ΔT et

ajuster la droite obtenue. Comparer à la valeur tabulée.

Vérifier que le rapport de la conductivité thermique et de la conductivité électrique est conforme à la loi de Wiedemann-Franz.

- Physique de l'état solide, Kittel (pour l'expression de la loi de Wiedemann-Franz)
- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique, « conduction thermique » (Adaptation)

17.3. Propriétés mécaniques

On étudie la propagation d'ondes mécaniques dans un bloc de duralumin (essentiellement composé d'aluminium) de longueur L . On peut alors en déduire la vitesse des ondes dans le métal : $c_m = 1 / (c_e - (T_e - T_m) / L)$ où T_e est mesuré en l'absence de bloc de duralumin et T_m en présence du bloc de duralumin. La vitesse des ondes mécaniques dans le métal étant donnée par $c_m = \sqrt{E/\rho}$. Connaissant la masse volumique ρ (sinon peser et mesurer le bloc) en déduire le module d'Young E du duralumin. Comparer à la valeur tabulée (celle de l'aluminium).

- CRC Handbook 83^{ème} édition (pour la valeur de E)
- Notice de l'expérience n°56

17.4. Propriétés magnétiques

Certains métaux comme le fer sont ferromagnétiques. Au delà d'une certaine température, dite température de Curie ils perdent leur caractère ferromagnétique pour devenir paramagnétique.

On évalue la température de transition ferromagnétique → paramagnétique du fer. Pour ce faire on approche un aimant d'un morceau de fer en contact avec un thermocouple. Les deux objets (aimant et morceau de fer) sont isolés thermiquement par un plaque ignifugée. Le morceau de fer est chauffé à l'aide d'un bec-meeker jusqu'à ce que l'aimant se décolle du fer. On a alors atteint la température de Curie. Relever la température indiquée par le thermocouple, comparer à la valeur tabulée

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique, « Transitions de phase »
- CRC Handbook 83^{ème} édition (pour la valeur de T_{curie})

18. Montage n°18 : Matériaux semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs ont la particularité d'avoir un niveau de Fermi en dehors des bandes de conduction et de valence. Le gap entre ces deux niveaux y est de l'ordre de l'électron-volt ce qui permet de les classer entre les conducteurs (absence de gap) et les isolants (gap de plusieurs électron-volt). Ils peuvent également être dopés. Cette particularité leur confère des propriétés physiques particulières.

18.1. Influence de la température

À l'aide d'un échantillon de semi-conducteur intrinsèque (germanium) équipé d'une résistance chauffante et d'un thermocouple, étudier l'influence de la température sur la résistivité du semi-conducteur. Tracer la droite $\ln(R)=f(1/T)$. La pente permet de remonter à la valeur du gap du matériau. Comparer à la valeur tabulée (0,76 eV pour le germanium).

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome III, Électronique, « Semi-conducteur »
- Notice de la plaquette n°598

18.2. Application : mesure de champs magnétiques

Du fait d'une conductivité relativement faible, les semi-conducteurs dopés soumis à un champ magnétique sont sujets à l'effet Hall. On place un tel semi-conducteur dans un électroaimant. La mesure du champ magnétique se fait à l'aide d'un fluxmètre. On trace alors la droite $V_H=f(B)$. La pente permet de remonter, connaissant la résistivité du semi-conducteur (la mesurer à l'ohmmètre), à la densité de porteurs de charges. Comparer à la valeur donnée dans la notice. Un tel dispositif constitue un bon moyen de mesurer des champs magnétiques, d'autant plus que la réponse est linéaire.

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome III, Électronique, « Semi-conducteur »
- Notice de la plaquette n°535

18.3. Comportement spectral

Envoyer de la lumière blanche sur une lamelle de semi-conducteur type GaP (phosphure de gallium). Ce semi-conducteur a la particularité d'avoir un gap dans le domaine du visible. Constater que la lumière en sortie est colorée. Le semi-conducteur absorbe donc une partie du rayonnement visible.

A l'aide d'un spectroscope USB on obtient le spectre blanc (sans la lamelle), le spectre noir et le spectre en transmission. On en déduit le spectre d'absorbance $A=f(\lambda)$. Les photons dont l'énergie est supérieure à l'énergie de gap sont absorbés. Pour des énergies inférieures, le milieu est transparent. Évaluer l'énergie du gap en électron-volt et comparer à la valeur tabulée.

- Physique de l'état solide, Kittel, chapitre 8 (valeur tabulée et principe de l'expérience)

18.4. Application : production d'énergie

Étude d'une cellule photovoltaïque à base de silicium polycristallin. Détermination rapidement la charge nominale donnée par $R_{th}=V_{co}/I_{cc}$. En éclairant la photopile à l'aide d'une lampe quartz-halogène, déterminer la puissance P en sortie en régime nominal. Remplacer la photopile par une thermopile de Moll placée exactement au même endroit et déterminer le flux lumineux

surfacique $P_S = P/S_{\text{thermopile}}$. En déduire le flux lumineux total reçu par la photopile $P_{\text{tot}} = P_S * S_{\text{photopile}}$. Enfin calculer le rendement $\eta = P/P_{\text{tot}}$ (typiquement $\sim 20\%$).

- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 2.4 – Détecteurs thermiques
- Notice de la thermopile de Moll n°80

19. Montage n°19 : Effets capacitifs

Dans un condensateur, les effets capacitifs se caractérisent par un stockage d'énergie électrique sous forme de charges de surface au niveau des armatures. Ce stockage peut être utilisé comme un avantage mais il se fait sur un certain temps caractéristique ce qui peut limiter le temps de réponse des instruments.

19.1. Mesure des capacités

19.1.1. Mesure par la méthode des ponts

On se propose de mesurer la capacité d'un condensateur à l'aide d'un pont dit « de Nernst ». Il permet de mesurer le couple (R,C) d'un condensateur dans le modèle parallèle à l'aide de résistances/condensateurs étalonnés. On peut alors en déduire l'angle de perte de ce dernier. Comparer aux valeurs données par un RLC-mètre en mode parallèle.

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, L'électricité, « Ccondensateur » et « Ponts de mesure en alternatif ».

19.1.2. Mesure par relaxation

On illustre ici le principe du capacimètre numérique. On utilise un multivibrateur astable comportant un condensateur. La période du signal de sortie dépend (de manière linéaire) de la valeur de cette capacité. On mesure la période du signal de sortie à l'aide d'un fréquencemètre pour différentes valeurs de capacités connues (étalonnage). On insère ensuite le condensateur de capacité inconnue et via la mesure de la période du signal on en déduit sa capacité. Comparer à la valeur donnée par le RLC-mètre

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome III, L'électronique, « Capacités (mesure) » et « Multivibrateur ».

19.2. Influence des caractéristiques du condensateur sur la capacité.

On étudie l'influence de l'écartement d des armatures de surface S d'un condensateur ainsi que l'insertion d'un diélectriques entre celles-ci sur la capacité. La capacité est mesurée à l'aide d'un LCR-mètre. La formule théorique est la suivante : $C = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot S/d$. Remonter à la valeur de ϵ_0 et comparer à la valeur tabulée.

- ▲ Penser à relier la borne « guard » du LCR-mètre aux masses des câbles coaxiaux utilisés

pendant la mesure pour éliminer la capacité de ces derniers.

- Notice du condensateur plan n°168

19.3. Application : mesure de niveau d'eau

On utilise un condensateur matérialisé par deux fils en cuivre, l'un verni, l'autre non. Lorsque ce condensateur est plongé dans l'eau, l'une des armatures (celle entourée de verni) joue le rôle de première armature et l'eau joue le rôle de seconde armature. Le verni lui joue le rôle de diélectrique. Ainsi le condensateur constitue un capteur de niveau d'eau et sa capacité C dépend linéairement de la longueur h de fil immergée.

Caractériser le capteur à l'aide de son diagramme de Bode. Constaté que son comportement est purement capacitif sur une certaine gamme de fréquence, il faudra travailler à une fréquence comprise dans cette gamme. Tracer ensuite la droite $C=f(h)$ en mesurant C au LCR-mètre et en faisant varier h .

- Notice du capteur de niveau d'eau n°197

19.4. Inconvénients des effets capacitifs

Moduler une DEL par un signal numérique (sortie TTL d'un GBF par exemple). Faire passer ce signal dans une fibre optique (optionnel) et le détecter à l'aide d'une photodiode polarisée en inverse en série avec une résistance. On étudie le temps de réponse du dispositif en fonction de la résistance. Montrer que le temps de réponse est limité par les effets capacitifs dans la photodiode pour R assez grand ($\tau=RC_{\text{photodiode}}$, comparer à la valeur de $C_{\text{photodiode}}$ de la notice). Dans ce cas, les effets capacitifs viennent limiter les performances des instruments de détection.

- Notice de la photodiode n°602
- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 2.2 – Photodiode

20. Montage n°20 : Induction, auto-induction

Un enroulement de conducteur est sujet à des effets inductifs. Ces effets sont le fait d'interactions entre les grandeurs électriques (tension et intensité) et le champ magnétique. L'auto-induction ne fait intervenir qu'un seul conducteur soumis à son flux propre contrairement à l'induction mutuelle qui fait intervenir au moins deux conducteurs.

20.1. Mesure d'une inductance propre

Réaliser un pont de mesure de type « Maxwell ». Dans ce pont on insère la bobine dont on veut mesurer l'inductance. Le reste du circuit est composé de composants de caractéristiques connues. En équilibrant le pont, il est possible *via* la condition d'équilibre de remonter à la valeur de l'inductance propre de la bobine. Travailler à une fréquence à laquelle le LCR-mètre

peut fonctionner, cela facilitera la comparaison par la suite.

Faire la mesure en excitant la bobine avec un créneau et en mesurant le temps de réponse $\tau = L/R$. Connaissant R en déduire L.

Comparer les valeurs obtenues avec celle donnée par un LCR-mètre.

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, Électricité, « Ponts de mesure en alternatif »

20.2. Mesure d'une inductance mutuelle

On procède par induction. Une bobine 1, parcourue par une intensité i_1 , crée un champ magnétique B_1 variable dans le temps. On accède à i_1 en mesurant la tension aux bornes d'une résistance en série avec la bobine 1. Une bobine 2 sensible au champ magnétique créé par 1 est le siège d'une force électromotrice e_2 . Tracer $e_2 = f(di_1/dt)$ pour différentes fréquences et en s'aidant d'un oscilloscope. La pente vaut alors $\pm M$ suivant l'orientation.

En déduire le coefficient de couplage $C = M/\sqrt{L_1 \cdot L_2}$ (L_1 et L_2 sont mesurés au LCR-mètre).

Constater au passage que e_2 est bien proportionnelle à la dérivée de i_1 donc de B_1 (loi de Faraday).

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, Électricité, « Induction (phénomène d) »

Refaire la manipulation pour une fréquence donnée et en présence d'un noyau de fer traversant les deux bobines. Constater que M est sensiblement plus grand.

20.3. Application : le transformateur

Utiliser un transformateur démontable et travailler à $f \sim 1\text{kHz}$. Pour différentes valeurs de tension u_1 aux bornes de la première bobine (n_1 spires), mesurer u_2 aux bornes de la bobine 2 (n_2 spires, en circuit ouvert). Tracer le graphe $u_2 = f(u_1)$ et déterminer la pente m . Comparer à la valeur attendue $m = n_2/n_1$.

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, Électricité, « Transformateur »

20.4. Application : le fluxmètre

Illustrer le principe de l'instrument. Pour cela on utilise un fluxmètre composé d'une bobine de surface S comportant n spires et relié à un intégrateur. Placer le fluxmètre dans un électroaimant et tracer $V = \int e \cdot dt = f(B)$. B est mesuré au teslamètre à effet hall. Conclure que ce dispositif est un capteur linéaire du champ magnétique.

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, Électricité, « Fluxmètre »

21. Montage n°21 : Production et conversion d'énergie électrique

Il existe de nombreux moyens de produire de l'électricité. La tension en sortie est soit alternative



(alternateur, ...) soit continue (énergie solaire, ...). Il faut utiliser une source d'énergie adaptée à chaque appareil d'où la nécessité des convertisseurs alternatif ↔ continu et des dispositifs permettant d'élever ou d'abaisser une tension.

21.1. Production d'électricité photovoltaïque

Étude d'une cellule photovoltaïque à base de silicium polycristallin. Détermination de la charge nominale en mesurant la puissance en sortie du dispositif en fonction de la résistance de charge. La comparer à la valeur prévue par la théorie : $R_{th} = V_{co}/I_{cc}$. En éclairant la photopile à l'aide d'une lampe quartz-halogène, déterminer la puissance maximale P_{max} en sortie (il suffit d'adapter la charge). Remplacer la photopile par une thermopile de Moll placée exactement au même endroit et déterminer le flux lumineux surfacique $P_s = P/S_{thermopile}$. En déduire le flux lumineux total reçu par la photopile $P_{tot} = P_s * S_{photopile}$. Enfin calculer le rendement $\eta = P_{max}/P_{tot}$ (typiquement 10% à 20%).

- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 2.4 – Détecteurs thermiques
- Notice de la thermopile de Moll n°80

En général il faut adapter la tension de sortie de la source au type d'appareil utilisé. Par quel moyen ?

21.2. Adapter la tension d'alimentation d'un appareil

Un moyen simple d'abaisser une tension est d'utiliser un pont diviseur de tension. Problème : le rendement est mauvais. Il existe un appareil plus adapté : le hacheur abaisseur de tension.

Étudier les différents régime du hacheur suivant la fréquence de commutation de l'interrupteur commandé : conduction continue et conduction ininterrompue. Noter que le régime de conduction interrompue n'est pas adaptée aux charges nécessitant une tension constante. Se placer dans le régime de conduction continue.

Dans ce régime, mesurer U_{charge} en fonction du rapport cyclique α et comparer à la relation $U_{charge} = \alpha \cdot U_0$. Pour une valeur de $U_{charge} = U_0/2$, calculer le rendement et comparer au rendement d'un pont diviseur permettant de faire la même opération (rendement 1/2).

☺ C'est la valeur moyenne de U_{charge} qui nous intéresse. On utilisera donc un voltmètre en mode continu pour la mesurer.

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, Électricité, « Hacheurs »

21.3. La problématique du transport de l'électricité

Pour minimiser les pertes en ligne il est nécessaire d'utiliser des tensions de transport élevées. Éventuellement illustrer ce fait par une expérience (voir référence ci-dessous). Ensuite lors de la distribution il faudra abaisser ces tensions. Dans les réseaux électriques ces opérations sont

effectuées à l'aide de transformateurs. Quelle loi relie les tension sortante en entrante du transformateur ? Quel est le rendement de ce type de dispositif ?

Utiliser un vrai transformateur. Étudier expérimentalement la loi de transformation des tensions $U_2/U_1=n_2/n_1$ et comparer à la valeur attendue.

Étudier les pertes du même transformateur par la méthode des pertes séparées. En déduire P_{fer} , P_{cuivre} en régime nominal. Calculer le rendement (typiquement 90%) en régime nominal et vérifier que : $P_{sortie} = P_{entrée} - P_{fer} - P_{cuivre}$.

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, Électricité, « Transformateurs »

21.4. La conversion alternatif-continu

Illustrer le principe de la conversion alternatif-continu à l'aide de la plaquette dédiée. Expliquer chacune des étapes (redressement, filtrage et stabilisation). Avant et après stabilisation, calculer le taux d'ondulation du signal.

■ Notice de la plaquette n°57

■ Expériences d'électronique, Duffait, Chapitre 12 - Conversion de puissance

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, Électricité, « Redressement et lissage »

☉ Il existe aussi des systèmes qui permettent de faire la conversion continu-alternatifs, ce sont des onduleurs.

22. Montage n°22 : Amplification de signaux

Les détecteurs (micro, thermopile, ...) délivrent généralement des signaux de faible amplitude ou de faible puissance. Il est alors nécessaire d'amplifier ces signaux à l'aide de dispositifs actifs. Ces amplificateurs sont caractérisés par leur gain (qui peut dépendre de la fréquence), leur écart à la linéarité et leurs impédances d'entrée et de sortie. De plus leur gamme de fonctionnement est généralement limitée par des phénomènes de saturations.

22.1. L'amplificateur opérationnel (AO)

22.1.1. Le compromis gain-bande

On étudie un AO type $\mu A741$ monté en amplificateur non inverseur. Le gain vaut $G=1+R_2/R_1$ où R_2 est la résistance dans la boucle de rétroaction reliée à la borne « - ». Faire varier R_2 pour faire varier le gain. Relever le diagramme de Bode de manière automatisée pour différentes valeurs de ce gain.

☉ Il faut éviter de travailler à de trop hautes fréquences et ou avec des tensions trop élevées pour ne pas d'atteindre les limitations de l'AO.

Ajuster les courbes obtenues à l'aide d'un modèle de type passe bas : $G=G_0/\sqrt{1+(f/fc)^2}$.

Relever les valeurs de G_0 et f_c et tracer $f_c = g(1/G_0)$, on attend une droite. Le produit gain-bande est alors conservé, il faut faire un compromis entre large bande passante et gain élevé. Comparer à la valeur donnée par le constructeur.

- Électronique expérimentale, Krob, chapitre 4 – Amplificateurs opérationnels
- Notice des AO n°368

22.1.2. Limitations

Mettons en évidence les limitations de l'AO.

Pour commencer, travailler avec un sinusoïde de haute fréquence (plusieurs MHz) et montrer que le signal se triangularise. Relever la valeur du slew-rate $s = (dv/dt)_{max}$, comparer à la valeur donnée par le constructeur.

Faire débiter l'AO dans une faible résistance et visualiser la tension au bornes de cette dernière. Conclure que l'AO ne peut pas débiter plus de quelques mA. Comparer à la valeur donnée par le constructeur.

☺ C'est le constructeur qui limite cette valeur pour protéger l'AO et éviter sa destruction par des intensités trop fortes.

Utiliser un AO en configuration non inverseur avec un gain de l'ordre de 10. Exciter l'entrée du dispositif avec une sinusoïde d'amplitude 5V. Constaté que la tension en sortie est écrêtée, elle ne peut pas dépasser la tension délivrée par l'alimentation symétrique.

- Électronique expérimentale, Krob, chapitre 4 – Amplificateurs opérationnels
- Notice des AO n°368

L'amplificateur opérationnel, correctement utilisé, n'introduit pas de distorsion du signal. Cependant, il n'est pas adapté aux fortes puissances, il ne peut fournir que quelques centaines de mW au maximum.

22.2. Le transistor bipolaire

Le transistor bipolaire a été inventé durant les années 1940. On doit son invention à entre autres John Bardeen, William Shockley et Walter Houser Brattain. Pour leurs travaux dans ce domaine, ils ont tous les trois reçu le prix Nobel de physique en 1956.

22.2.1. Gain en courant

On utilise un transistor NPN de puissance monté sur radiateur. On cherche à tracer la caractéristique $I_E = f(I_B)$ donnant le courant en sortie de l'émetteur en fonction du courant de base. Pour cela on utilise deux ampèremètres placés en sortie et en entrée du transistor. La droite obtenue a pour pente β appelé gain en courant. Comparer la valeur obtenue à la valeur donnée

par le constructeur. Dans cette configuration le transistor est une source de courant commandée en courant.

☺ Des montages plus complexes de type transistor à émetteur/collecteur commun peuvent aussi être étudiés. Ils ont le mérite d'être plus proche de ce qui est utilisé dans la réalité mais ils sont moins pédagogiques.

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome III, L'électronique, « Transistor »

Faire débiter le transistor dans une résistance de charge de quelques ohms et visualiser la tension à ses bornes sur un oscilloscope. Commander la base du transistor par une tension (donc un courant) alternative et constater que la moitié du signal est coupé. Il faut ajouter un transistor PNP pour récupérer l'autre partie du signal.

22.2.2. Le Push-Pull

- Rendement

Utiliser deux transistor l'un PNP l'autre NPN convenablement polarisés et relier leurs émetteurs. Faire débiter ce dispositif dans une résistance de charge. Constater que cette fois le signal est convenablement restitué à une distorsion près autour de la tension nulle.

En mesurant le courant moyen (ampèremètre en continu) qui circule entre les alimentations et les deux collecteurs en déduire la puissance fournie ($P_e = 2 * U * I_{moyen}$). Mesurer la puissance dissipée dans la charge ($P_s = R * I_R^2$). En déduire le rendement η du dispositif ($\eta > 60\%$).

■ Expériences d'électronique, Duffait, Chapitre 6 – Amplification

- Impédances d'entrée et de sortie

Mesurer les résistances d'entrée et de sortie du dispositif à l'aide de la méthode des tensions moitiés (voir référence). Pour mesurer la résistance de sortie on peut tracer $V_s = f(i_s)$. La pente de la droite vaut alors $-R_{sortie}$. Conclure que la résistance de sortie est relativement faible (quelques Ω) tandis que la résistance d'entrée est élevée (quelques $k\Omega$) ce qui en fait un bon amplificateur de fin de chaîne.

Brancher un haut-parleur possédant une impédance de quelques Ω directement sur un GBF. Constater que l'énergie n'est quasiment pas transférée vers le haut parleur. Intercaler le push-pull, l'impédance est maintenant adaptée, le transfert d'énergie est plus efficace.

■ Expériences d'électronique, Duffait, Chapitre 6 – Amplification

- Distorsion et correction

Mesurer les tensions $V_{e,min}$ et $V_{e,max}$ extrêmes telles que $V_s = 0V$ (on peut le faire en mode XY). Cette distorsion est due aux seuils des jonctions PN. Comparer à la valeur typique attendue ($\sim 2 * 0,6V$ pour du silicium). Pour amplifier des petits signaux pour l'acoustique par exemple,

cette distorsion est problématique.

Corriger cette distorsion en plaçant deux diodes au silicium ($V_{\text{seuil}}=0,6\text{V}$) entre le signal de commande et les bases ainsi que des résistances entre ces diodes et l'alimentation symétrique (voir référence).

■ Expériences d'électronique, Duffait, Chapitre 6 – Amplification

23. Montage n°23 : Mise en forme, transport et détection de l'information

Généralement, pour transmettre de l'information (signal numérique ou analogie) il est nécessaire d'adapter sa forme (fréquence, support) au canal de transmission. Le changement de fréquence peut se faire via des procédés de modulation. S'ensuit la phase de transport, de détection puis de démodulation.

23.1. La modulation/démodulation d'amplitude

Dans ce cas, la grandeur d'intérêt est l'amplitude du signal modulé. Illustrer le principe de la modulation d'amplitude en multipliant le signal modulant de basse fréquence f_M par le signal modulé de haute fréquence f_p . Constater qu'en sortie du multiplieur, on obtient un spectre composé de trois fréquences centrées sur la fréquence de la porteuse. Calculer le taux de modulation. Montrer le principe du transport dans l'air à l'aide de deux bobines couplées par mutuelles (en réalité ce rôle est joué par des antennes). Appliquer un détecteur de crête composé d'une diode et d'un passe bas de fréquence de coupure f_C adaptée ($f_M \ll f_C \ll f_p$). Constater que l'on réceptionne bien le signal initial en sortie.

Montrer le principe de la détection synchrone en remplaçant le détecteur de crête par un multiplieur qui va permettre de multiplier de nouveau le signal modulé par la porteuse.

■ Expériences d'électronique, Duffait, chapitre 9 -Modulation, démodulation

23.2. La modulation/démodulation de fréquence

Dans ce cas la grandeur informative est la fréquence instantanée du signal modulé.

Montrer le principe de fonctionnement d'une boucle à verrouillage de phase (PLL) en utilisant un signal d'entrée sinusoïdal. L'oscillateur commandé en tension (OCT) de la PLL devra avoir une fréquence centrale proche de celle du générateur en entrée. Remarquer que le signal récupéré en sortie du filtre passe-bas de la PLL est proportionnel à la fréquence du signal d'entrée. Ce dispositif permet de démoduler le signal. En sortie de l'OCT on récupère aussi la fréquence initiale ce qui permet d'utiliser ce dispositif pour la démodulation synchrone d'amplitude.

Construire le graphe de la largeur de la plage de verrouillage Δf en fonction de l'amplitude de la tension de sortie de l'OCT V . On attend une droite dont le facteur de proportionnalité dépend des

composants de la PLL et de l'amplitude du signal d'entrée. A la lumière de ce résultat, optimiser la plage de verrouillage de la boucle.

Enfin passer le générateur d'entrée en mode OCT, la tension de contrôle étant un signal informatique analogique (sortie d'un baladeur ou d'un micro). Récupérer le signal démodulé en sortie du passe bas de la PLL, l'envoyer sur un amplificateur puis le diffuser à l'aide d'un haut parleur.

- Expériences d'électronique, Duffait, chapitre 9 -Modulation, démodulation

23.3. La problématique du transport

23.3.1. Transport électrique

Mesurer le facteur d'atténuation linéique d'un câble coaxial $r=20 \log(V_f/V_e)$ en envoyant un pulse court dans le câble. En déduire la longueur de câble pour laquelle le signal est divisé par 2. Évaluer la dispersion du câble et en déduire le débit maximal (en bit/s). En conclure que le transport du signal sur plusieurs kilomètres nécessite des répéteurs.

23.3.2. Transport lumineux

Moduler une diode laser (ou une DEL) par un signal numérique (sortie TTL d'un GBF par exemple). C'est de la modulation d'amplitude comme dans la partie 1. Faire passer ce signal dans une fibre optique et le détecter à l'aide d'une photodiode polarisée en inverse en série avec une résistance. On étudie le temps de réponse du dispositif en fonction de la résistance. Montrer que le temps de réponse est limité par les effets capacitifs dans la photodiode pour R assez grand ($\tau=RC_{\text{photodiode}}$, comparer à la valeur de $C_{\text{photodiode}}$ de la notice) et par le temps de réponse de la diode laser pour les valeurs de R faibles. Cette fois ci le facteur qui vient limiter le débit provient de la limitation des performances des instruments de détection.

- Notice de la diode laser et de la photodiode n°602
- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 2.2 – Photodiode

24. Montage n°24 : Acquisition, analyse et traitements des signaux

L'électronique moderne utilise des signaux électriques analogiques ou numériques très variés et parfois complexes. On peut les traiter et les analyser de manière analogique. Cependant pour profiter de la puissance d'analyse de l'outil informatique, il est nécessaire, si ce n'est déjà fait, de les numériser.

24.1. Les méthodes analogiques

24.1.1. Le traitement analogique

- Méthode 1



En laboratoire, les signaux détectés sont parfois bruités. On cherche en général à mesurer leur amplitude et le bruit gêne cette mesure.

Si la fréquence du bruit est bien identifiée on peut utiliser un filtre. Sommer un signal informatif de fréquence 1kHz et un bruit à 100KHz. Constater que le bruit gêne la mesure de l'amplitude du signal informatif. Intercaler un filtre passe bas RC de fréquence de coupure $\sim 1\text{kHz}$ et constater que le bruit est fortement atténué.

- Méthode 2

Si le signal détecté est à la même fréquence que le signal d'entrée alors on peut nettoyer ce signal par détection synchrone puisque l'on connaît la fréquence exacte du signal informatif. Pour cela il suffit de multiplier le signal bruité (on s'aidera d'un amplificateur de bruit ambiant pour générer ce bruit) par le signal d'entrée. Ensuite il suffit de filtrer le signal obtenu à l'aide d'un filtre passe bas RC de fréquence de coupure faible. Le signal obtenu est alors directement proportionnel à l'amplitude du signal informatif.

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome III, L'électronique, « Détection synchrone »

24.1.2. Analyseur de spectre analogique

La méthode de détection synchrone peut servir de base pour faire un analyseur de spectre analogique. Multiplier un signal riche spectralement (créneau) composé des fréquences f_n et un signal sinusoïdal dont la fréquence f varie au cours du temps (wobulation). En sortie du multiplieur ajouter une diode de signal (redressement) et un filtre passe bas (filtrage). Le signal est non nul lorsque $f=f_n$. Mesurer les f_n pour un créneau et constater qu'il se compose exclusivement d'harmoniques impaires : $f_n = f_0 * (2n+1) n \in \mathbb{N}$.

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome III, L'électronique, « Analyseur de spectre »

24.2. Les méthodes numériques

24.2.1. La conversion analogique numérique

Illustrer le principe de l'échantillonneur-bloqueur. Un générateur délivre une tension sinusoïdale de fréquence f qui vient charger ou décharger un condensateur. Ces phases de charges et de décharge sont interrompues par un relais commandé par un autre générateur à la fréquence f_{ech} . La tension aux bornes du condensateur est « recopiée » par un suiveur de tension qui évite la décharge du condensateur. Visualiser la tension en sortie du suiveur.

Constater que pour des fréquences $f_{ech} < 2 \times f$, le signal est mal restitué. Il faut que $f_{ech} > 2 \times f$ pour que les mesures de fréquences soient correctes : c'est le critère de Shannon. Dans le cas contraire on observe un effet stroboscopique qui fausse les mesures de fréquences.

■ Expériences d'électronique, Duffait, Chapitre 11 – Multimètres et convertisseurs

L'échantillonnage temporel est la première étape de la numérisation. Il faut ensuite, dans le laps de temps où la tension est bloquée, la convertir en une grandeur numérique : c'est l'échantillonnage en tension. Ce principe est illustré par un convertisseur tension-temps simple rampe. Un compteur commandé par un GBF délivrant un signal créneau est couplé à un convertisseur numérique-analogique (CNA). Cela permet de générer une rampe discrétisée. Un comparateur vient ensuite comparer la tension continue à mesurer à la tension de rampe. Il bascule lorsque $V_{\text{rampe}} > V_{\text{mesurée}}$ ou lorsque la rampe revient à $V_{\text{rampe}} = 0$. Ces basculements viennent commander un porte « ET » placé avant le compteur. L'autre entrée de cette porte est reliée au GBF qui commande le compteur. Ainsi, lorsque le comparateur bascule, l'incréméntation du compteur est stoppée à une certaine valeur $n \in \llbracket 0, N \rrbracket$. On peut alors évaluer $V_{\text{mesurée}} = V_{\text{max}} / 2^N \times n$. L'incertitude sur la mesure est déterminée par la discrétisation de la rampe et vaut $V_{\text{max}} / 2^N$ où N est le nombre de bits du compteur.

■ Expériences d'électronique, Duffait, Chapitre 11 – Multimètres et convertisseurs

24.2.2. Le traitement numérique

Envoyer un signal bruité sur un oscilloscope et constater que plus on moyenne le signal et plus le signal est propre. On peut alors mesurer son amplitude plus facilement. C'est un des avantages de la numérisation.

Faire le FFT d'un signal sinusoïdal et montrer que l'algorithme possède des limitations dues au temps fini d'enregistrement. Montrer l'effet des différentes pondérations de fenêtre et du temps d'acquisition sur la qualité de la FFT.

25. Montage n°25 : Mesure des fréquences temporelles (optique exclue).

Un signal périodique est caractérisé par sa décomposition spectrale. La fréquence du signal peut constituer une information importante comme c'est le cas lors de la modulation de fréquence.

25.1. Mesure de fréquences en électricité

25.2. Méthodes analogiques

- Par un pont de mesure

Réaliser un pont fréquencemètre de Wien-Robinson (RC parallèle). Ce pont a la spécificité d'avoir une condition d'équilibre qui dépend de la fréquence. La condition d'équilibre s'écrit $RC\omega = 1$. En déterminant les valeurs de R et de C à l'équilibre, on en déduit la fréquence $f = \omega / 2\pi$ d'excitation du pont. L'incertitude sur f est déterminée par celles qui pèsent sur R et sur C . Cette méthode est peu précise mais elle présente l'avantage de ne pas utiliser de source de fréquence étalonée.

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, L'électricité, « Ponts de mesures en alternatif »

- Par détection synchrone

On peut réaliser un analyseur de spectre analogique à l'aide de la détection synchrone. Multiplier un signal riche spectralement (créneau) composé des fréquences f_n et un signal sinusoïdal dont la fréquence f varie au cours du temps (wobulation). En sortie du multiplieur ajouter une diode de signal (redressement) et un filtre passe bas (filtrage). Le signal est non nul lorsque $f=f_n$. Mesurer les f_n pour un créneau et constater qu'il se compose exclusivement d'harmoniques impaires : $f_n=f_0*(2n+1) n \in \mathbb{N}$. Cette méthode est précise mais nécessite l'utilisation d'une source dont on connaît la fréquence de manière précise.

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome III, L'électronique, « Analyseur de spectre »

25.3. Méthodes numériques

- Fréquence-mètre numérique

Illustrer le principe du fréquence-mètre/période-mètre numérique pour mesurer la fréquence d'un signal de fréquence inconnue. Visualiser étape après étape le signal de la plaquette de démonstration. Et montrer que le nombre compté en sortie est bien l'image de la fréquence d'entrée. Évaluer l'incertitude sur la mesure de fréquence, elle vaut 1Hz pour une mesure sur 1s. Montrer que le dispositif peut aussi être utilisé en période-mètre. Évaluer l'incertitude sur la mesure de la période.

■ Notice de la plaquette de démonstration n°448

■ Expériences d'électronique, Duffait, Chapitre 11 – Multimètres et convertisseurs

- Algorithme de FFT

Illustrer l'utilisation de la FFT sur un oscilloscope. Montrer l'importance du critère de Shannon pour éviter le repliement. Montrer l'influence sur la résolution d'une augmentation de la fréquence d'échantillonnage. Illustrer l'intérêt des fonctions de pondération de fenêtre.

25.4. Mesure de fréquences en mécanique et acoustique

25.4.1. Par stroboscopie

Utiliser un stroboscope pour déterminer de manière précise la fréquence de rotation d'une roue comportant un point de repère. Pour avoir plus de précision faire un ajustement $\omega = g(1/n)$ pour des fréquences $f_n = f_0/n$ sous multiples de la fréquence f_0 recherchée.

25.4.2. Par hétérodynage

Exciter deux diapasons dont l'un est désaccordé à l'aide d'une petite masselotte. Détecter les

battements de l'amplitude sonore à l'aide d'un micro. Mesurer la fréquence des battements, en déduire la fréquence $f' = f_0 \pm \Delta f / 2$ du diapason désaccordé. Comparer à la valeur obtenue à l'aide de la FFT.

26. Montage n°26 : Mesure de longueurs

Historiquement le mètre était défini à partir d'un mètre étalon. Cependant cette définition peu précise a été abandonnée. Dans le système international d'unité actuel, le mètre est défini à partir de la vitesse de la lumière qui, elle, est fixée. Pour mesurer de petites longueurs, la lumière constitue un outil privilégié.

26.1. Mesure des grandes distance

On illustre le principe de la télémétrie optique en utilisant un émetteur/récepteur constitué d'une DEL et d'une photodiode. Le signal incident est réfléchi sur un réflecteur composé de miroirs en coins de cubes. La mesure du temps τ de propagation permet de déterminer la distance $L = 1/2 \cdot c \cdot \tau$. Évaluer l'incertitude sur cette mesure. Conclure que plus L est grand et plus l'incertitude relative sur celle-ci est petite.

☉ Cette méthode a été utilisée pour mesurer la distance Terre-Lune.

■ Notice du télémètre optique n°620

26.2. Mesure des petits distances

26.2.1. Par diffraction lumineuse

Faire diffracter un faisceau laser élargi sur des spores de lycopodes. La figure de diffraction est une tache d'Airy. Le rayon de la première zone sombre est donnée par la formule $R = 1,22 \times \lambda \cdot D / L$ L étant le diamètre des pores. Comparer à la valeur obtenue à l'aide d'un microscope standard muni d'une mire micrométrique. Conclure que la méthode par diffraction est bien plus précise.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 3.3 – Diffraction

26.2.2. Par diffraction électronique

Envoyer un faisceau électronique sur du graphite. Le faisceau est diffracté et vient percuter un écran fluorescent. Évaluer l'énergie des électrons et la longueur d'onde de De Broglie correspondante ($E = eV = hc / \lambda$). Elle doit être comparable aux longueurs que l'on veut mesurer. Partant des caractéristiques de la tâche de diffraction, déterminer, de manière analogue à la partie précédente, les paramètres de maille du graphite.

■ Notice de dispositif n°304

26.3. Mesure des très petites longueurs (d'onde)



Régler un interféromètre de Michelson en lame d'air. Utiliser une lampe à vapeur de mercure et intercaler un filtre entre l'entrée et la lampe pour ne garder que le doublet jaune. Placer un photodiode au centre de la figure d'interférence et charioter un miroir à l'aide d'un moteur de vitesse connue. Faire un enregistrement autour du contact optique et pour quelques fuseaux (le contraste s'annule à intervalles réguliers). À partir de cet enregistrement en déduire λ_{moyen} , $\Delta\lambda$ et évaluer la largeur des raies. On a alors mesuré des longueurs (d'onde) de l'ordre du nanomètre.

■ Optique expérimentale, Sextant, chapitre 5.2 – Spectroscopes interférentiels

27. Montage n°27 : Systèmes bouclés

En électronique, parmi les systèmes bouclés, on distingue, entre autres, deux grandes classes : les oscillateurs auto-entretenus et les systèmes asservis. Le but de ce montage est d'illustrer et de caractériser ces systèmes. Les oscillateurs auto-entretenus génèrent un signal périodique sans qu'il y ait besoin d'introduire un signal d'entrée. Les systèmes asservis permettent de s'assurer qu'une grandeur physique tend vers la grandeur de consigne choisie par l'opérateur.

27.1. Réalisation d'un oscillateur quasi-sinusoïdaux

Les oscillateurs auto-entretenus sont traditionnellement répartis en deux classes : les oscillateurs quasi-sinusoïdaux (peu de non linéarités) et les oscillateurs à relaxation (fortes non linéarités). On illustre le principe d'un oscillateur quasi-sinusoïdal à l'aide d'un oscillateur à pont de Wien. Il est constitué d'un amplificateur non inverseur et d'un filtre passe bande peu sélectif qui fait office de chaîne de retour (réaction positive).

Tout d'abord l'oscillateur est étudié en boucle ouverte. À l'aide d'un diagramme de Bode, on illustre le critère de stabilité de Nyquist en faisant varier les paramètres de l'amplificateur non inverseur, on mesure la pulsation de résonance ω_0 du système et son facteur de qualité Q .

Le système étant bouclé, on montre que quand le critère de stabilité de Nyquist est vérifié, il n'y a pas d'oscillations. On cherche la plus petite valeur de l'amplification pour laquelle les oscillations démarrent. Montrer que le système oscille alors à ω_0 . Pour des amplifications trop grandes, les non-linéarités deviennent importantes. Montrer l'effet sur le diagramme de phase de l'oscillateur (utilisation d'un dérivateur).

■ Électronique expérimentale, Krob, chapitre 5.2 – Oscillateurs en électronique

27.2. Les oscillateurs à relaxation, réalisation et applications

L'oscillateur précédent présente de nombreuses limitations. Même si à la limite des oscillations, le signal est très pur spectralement, ce système a une stabilité en fréquence médiocre (facteur de qualité faible). De plus il n'est pas aisé de moduler sa fréquence d'oscillation.

On se propose dans cette partie de réaliser un oscillateur à relaxation. Il est constitué d'un

intégrateur et d'un comparateur bouclé sur l'intégrateur. Mesurer la période des oscillations (crêteaux ou dents de scie) et comparer à la valeur attendue. Ajouter un circuit permettant de faire varier le rapport cyclique (diodes+potentiomètre) et montrer son effet sur le signal. Enfin ajouter un multiplieur sur la boucle de retour et multiplier le signal de retour par une tension constante V_c . Observer que l'oscillateur est maintenant commandé par la tension V_c . Tracer le graphique représentant la fréquence d'oscillation en fonction de la tension de consigne V_c .

- Expériences d'électronique, Duffait, chapitre VIII, section 3 - Oscillateurs

27.3. Asservissement, stabilité, rapidité et précision

Dans le cas d'un système asservi, contrairement aux oscillateurs, on recherche la stabilité. À l'aide d'un dispositif de régulation de température comportant un bloc de cuivre (conducteur thermique), une thermistance (mesure de la température) et un module Peltier (modification de la température) on illustre le principe de l'asservissement tout ou rien, proportionnel et proportionnel-intégral. On montre les limites de chacun de ces modes de régulation. Pour l'asservissement tout ou rien avec hystérésis, le régime permanent est oscillant. Pour l'asservissement proportionnel, l'erreur statique est non nulle. Pour l'asservissement proportionnel-intégral, l'erreur statique est nulle et le système réactif mais il existe un dépassement de la consigne et la stabilité est moindre.

- Notice de l'ensemble pour l'étude d'une régulation de température n°205
- Électronique expérimentale, Krob, chapitre 9 - Asservissement d'une grandeur physique (pour la théorie)

28. Montage n°28 : Instabilités et phénomènes non linéaires

Les phénomènes linéaires constituent une infime partie des situations réelles. Bien souvent ces situations peuvent, sous certaines conditions, être linéarisés (au sens mathématique du terme). Mais pour certains phénomènes, les non linéarités sont déterminantes et ce sont elles qui régissent l'évolution du système.

28.1. Du linéaire au non linéaire

On étudie la dépendance de la période d'oscillation T d'un pendule pesant en fonction de l'amplitude des oscillations θ_0 . Dans l'approximation linéaire (petits angles), il y a isochronisme et $T=T_0$. Pour les angles plus grands il faut prendre en compte un terme correctif et on obtient la formule de Borda : $T=T_0(1+\theta_0^2/16)$. Relever la période des oscillations pour différentes amplitudes et tracer $T=f(\theta_0)$. Vérifier la validité de la formule de Borda en effectuant un ajustement.

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome I, Mécanique, « pendule pesant »

28.2. Instabilités et phénomènes non linéaires en électricité

28.2.1. Critère de stabilité, instabilités et non linéarités

Dans un oscillateur, l'instabilité est fondamentale, c'est elle qui commande les oscillations. On illustre le principe d'un oscillateur quasi-sinusoïdal à l'aide d'un oscillateur à pont de Wien. Tout d'abord l'oscillateur est étudié en boucle ouverte. À l'aide d'un diagramme de Bode, on illustre le critère de stabilité de Nyquist en faisant varier les paramètres de l'amplificateur non inverseur.

Le système étant bouclé, on montre que quand le critère de stabilité de Nyquist est vérifié, il n'y a pas d'oscillations. On cherche la plus petite valeur de l'amplification pour laquelle les oscillations démarrent. Montrer que le système oscille alors à ω_0 . Une fois les oscillations démarrées, les non-linéarités deviennent importantes et limitent l'amplitude (saturation de l'AO). Montrer l'effet sur le diagramme de phase de l'oscillateur (utilisation d'un dérivateur).

- Électronique expérimentale, Krob, chapitre 5.2 – Oscillateurs en électronique

28.2.2. Construction d'un oscillateur non linéaire

Une plaquette pré-câblée permet d'obtenir un oscillateur de type Van-Der-Poll. Ne pas rajouter de non linéarité et constater que le système se comporte comme un oscillateur harmonique amorti, il est linéaire.

Construire une non linéarité cubique (voir référence) et faire l'acquisition de sa fonction de transfert $V_s = f(V_e)$ sur ordinateur. Ajuster la courbe obtenue et comparer les valeurs des paramètres à celles attendues. Faire la FFT et montrer que le système génère des harmoniques impaires.

Intégrer la non linéarité à l'oscillateur de Van-Der-Poll. Cette dernière va permettre d'entretenir les oscillations. Pour des oscillations faibles, le gain sera élevé, elles seront amplifiées. Pour des oscillations importantes, le gain diminue. Observer le portrait de phase de l'oscillateur et remarquer qu'il possède maintenant un cycle attracteur. La non linéarité permet de contrôler l'amplitude des oscillations de manière douce (pas de saturation).

- Électronique expérimentale, Krob, chapitre 6 – phénomènes non linéaires en physique
- Notice de la plaquette n°63

28.3. Phénomène de bifurcation fourche

Pour un pendule conique de fréquence propre f_0 dont on force la rotation à une fréquence f , il apparaît une bifurcation fourche pour $f > f_0$. Cela se traduit par l'existence de deux positions d'équilibres symétriques $\theta_2 = -\theta_1$. La non-linéarité crée un potentiel à deux minima pour $f > f_0$

qui conduit à l'existence de deux positions stables. Faire l'acquisition pour différentes valeurs de f et ajuster au voisinage de la bifurcation par la fonction $\theta = \alpha \times \sqrt{f - f_0}$.

- Notice du pendule conique n°10

29. Montage n°29 : Ondes, propagation et conditions aux limites

Les phénomènes ondulatoires sont présents dans de nombreux domaines de la physique. Une onde est caractérisée par son amplitude, sa direction, sa fréquence temporelle f et sa longueur d'onde λ . On peut définir sa vitesse de phase $c_p = \omega/k$ et sa vitesse de groupe $c_g = d\omega/dk$. On sait que lorsque l'on impose des conditions aux limites, l'onde ne peut se propager que suivant certains modes appelés modes propres. On se propose dans ce montage d'étudier des phénomènes ondulatoires en régime libre ou guidé.

29.1. Ondes acoustiques, conditions aux limites et modes propres

29.1.1. Propagation libre des ondes sonores

On étudie la propagation libre des ondes sonores à l'aide d'un émetteur à ultrason et d'un récepteur. Placer le récepteur de manière à obtenir des signaux émis/reçu en phase (visualisation sur un oscilloscope). Mesurer la longueur d'onde λ en éloignant le récepteur d'une distance L de l'émetteur de manière à obtenir de nouveau des signaux en phase. Connaissant $f=40\text{kHz}$, en déduire la vitesse $c=f\lambda$ de ces ondes. Comparer à la valeur donnée par la formule $c = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T / M}$.

- Bulletin de l'union des physiciens n°742 ou notice n°55
- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome I, Mécanique, « Ultrasons »

29.1.2. Propagation guidée des ondes sonores

On étudie la propagation des mêmes ondes ultrasonores mais cette fois-ci en régime guidé à l'aide d'un tube en plastique. Le signal émis se présente sous la forme de trains d'onde. Le signal reçu fait apparaître plusieurs modes dus à la condition $v^\perp = 0$ m/s sur les parois du tube. Pour chacun de ces modes, calculer la vitesse de groupe. Comparer aux valeurs données par la formule théorique.

- Bulletin de l'union des physiciens n°742 ou notice n°55
- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome I, Mécanique, « Ultrasons »

29.2. Propagation d'ondes mécaniques à l'interface entre deux milieux

On se propose maintenant d'étudier la propagation d'ondes surfaciques à l'interface entre l'eau et l'air. Pour cela on utilise une cuve à onde. Pour chaque valeur de la fréquence d'excitation, mesurer la longueur d'onde des ondes à la surface de l'eau. Ajuster par la formule théorique :

$$\omega^2 = th(k \cdot h) \times \left(g \cdot k + \frac{\gamma \cdot k^3}{\rho} \right)$$

h est la hauteur d'eau, γ le coefficient de tension superficielle air-eau et ρ la masse volumique de l'eau.

- ☺ Il faut contraindre la valeur de g à 9,81 N/m dans la formule.
- ☺ Comme k.h est grand, $th(k.h) \sim 1$ ce qui simplifie la formule.

- Hydrodynamique physique, Guyon – Hulin – Petit, EDP sciences, 2^{ème} édition, chapitre 6
- Notice de la cuve à onde n°614
- CRC Handbook 83^{ème} édition (pour la valeur de γ)

29.3. Propagation d'ondes électromagnétiques en régime guidé

Envoyer des impulsions de quelques nanosecondes dans un câble coaxial de quelques dizaines de mètres. Mesurer la vitesse de propagation $v = t/2L$. À l'aide d'un LCR-mètre mesurer l'inductance propre L (en circuit fermé) et la capacité du câble C (en circuit ouvert). En déduire les grandeurs linéiques l et c associées. Comparer la valeur attendue de la célérité : $v = 1/\sqrt{l \cdot c}$ et la valeur mesurée. Calculer l'impédance caractéristique du câble $Z = \sqrt{l/c}$ et comparer à la valeur attendue $Z_c = 50\Omega$. Faire varier l'impédance en bout de ligne (0Ω , 50Ω , et infinie) et montrer que les observations sont conformes à l'expression du coefficient de réflexion :

$$\mathfrak{R} = (R - Z_c) / (Z_c + R) .$$

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, L'électricité, « Lignes électriques »

30. Montage n°30 : Acoustique

Les ondes acoustiques sont des ondes mécanique car elles nécessitent la présence d'un milieu matériel pour se propager. Ce sont des ondes longitudinales caractérisées par leur vitesse, leur fréquence et leur longueur d'onde. On définit les vitesses de phase $v_\varphi = \omega/k$ et de groupe $v_G = d\omega/dk$.

30.1. Propagation libre et guidée d'une ondes sonores

30.1.1. Propagation libre des ondes sonores

On étudie la propagation libre des ondes sonores à l'aide d'un émetteur à ultrason et d'un récepteur. Placer le récepteur de manière à obtenir des signaux émis/reçu en phase (visualisation sur un oscilloscope). Mesurer la longueur d'onde λ en éloignant le récepteur d'une distance L de l'émetteur de manière à obtenir de nouveau des signaux en phase. Connaissant $f = 40\text{kHz}$, en déduire la vitesse $c = f \times \lambda$ de ces ondes. Comparer à la valeur donnée par la formule $c = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T / M}$.

- Bulletin de l'union des physiciens n°742 ou notice n°55
- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome I, Mécanique, « Ultrasons »

30.1.2. Propagation guidée des ondes sonores

On étudie la propagation des mêmes ondes ultrasonores mais cette fois ci en régime guidée à l'aide d'un tube en plastique. Le signal émis se présente sous la forme de trains d'onde. Le signal reçu fait apparaître plusieurs modes dus à la condition $v^{\perp}=0$ m/s sur les parois du tube. Pour chacun de ces modes, calculer la vitesse de groupe. Comparer aux valeurs données par la formule théorique.

- Bulletin de l'union des physiciens n°742 ou notice n°55
- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome I, Mécanique, « Ultrasons »

30.2. Application : mesure de la vitesse d'un objet

On montre le principe du radar. Une onde émise à l'aide d'un émetteur ultrason est captée, après réflexion sur un objet métallique en translation à la vitesse v , par un récepteur piézoélectrique. La translation rectiligne uniforme de l'objet est obtenue en plaçant ce dernier sur une table traçante. Les signaux incident et réfléchi sont multipliés aux bornes d'un multiplieur analogique et le signal de sortie est visualisé sur un oscilloscope. La fréquence des battements observés est $\Delta f = f_2 - f_1$. Pour plusieurs valeurs de v tracer $\Delta f = g(v)$. La théorie prévoit $|f_2 - f_1| = f_1 \times v/c$. Conclure que le dispositif est un capteur de vitesse.

- Bulletin de l'union des physiciens n°804

30.3. Application : mesure du module d'Young du Duralumin

On crée des impulsions ultra-sonores qui vont ensuite se propager dans un bloc de duralumin de longueur L plongé et dans l'eau. La détection se fait de l'autre côté du bloc. On mesure ainsi le temps de propagation en présence et en l'absence du bloc. On en déduit alors la célérité c_m des ondes sonores dans le duralumin via la formule $c_m = 1/(c_{eau} - (T_{eau} - T_m)/L)$. La théorie prévoit $c_m = \sqrt{E/\rho}$ ou E est le module d'Young du duralumin et ρ sa masse volumique. Déterminer ρ en pesant le bloc et en mesurant ses dimensions ($\rho = m/(l.L.h)$). En déduire E , comparer à la valeur tabulée (à défaut prendre celle de l'aluminium).

☺ Le Duralumin est essentiellement constitué d'aluminium (pourcentage massique > à 90 %)

- Notice de l'expérience n°56
- CRC Handbook 83^{ème} édition (pour la valeur de E)

31. Montage n°31 : Résonance

Les systèmes oscillants possèdent une ou plusieurs fréquences propres. Lorsqu'on excite ces



systèmes à une fréquence proche de l'une de ses fréquences propres, on peut observer un phénomène de résonance qui se traduit par un maximum d'amplitude d'une grandeur physique et par une dissipation maximale d'énergie.

31.1. Phénomènes de résonance en électricité

31.1.1. Étude d'un système électrique résonant

Effectuer l'étude détaillée d'un circuit RLC série. Visualiser la courbe de résonance en utilisant un générateur en mode wobble et en visualisant la tension aux bornes de la résistance. En déduire les caractéristiques du RLC : fréquence centrale f_0 , largeur à $V_{max}/\sqrt{2}$ notée Δf . Comparer les valeurs obtenues pour $Q=f/\Delta f$ et f_0 à celles attendues : $Q=1/R_{tot}\times\sqrt{L/C}$ et $f_0=1/(2.\pi.\sqrt{L.C})$.

☺ R_{tot} est la résistance totale du circuit : $R_{tot}=R_{générateur}+R_{bobine}+R$

☺ La résistance d'une bobine dépend fortement de la fréquence à laquelle on travaille à cause de l'effet de peau. Mesurer R au LCR-mètre en se plaçant à une fréquence la plus proche possible de la fréquence de résonance sans quoi les résultats seront médiocres.

Faire varier R et tracer $Q=g(1/R_{tot})$. Vérifier que la pente vaut bien $\sqrt{L/C}$.

■ Électronique expérimentale, Krob, chapitre 7.3 - Acquisition et traitement des signaux

31.1.2. Influence du couplage de plusieurs systèmes résonants

Observer la réponse d'une chaîne de N oscillateurs LC couplés soumis à un signal créneau (réponse impulsionnelle). Faire la FFT sur l'oscilloscope et constater que le signal de sortie est une combinaison linéaire des différentes fréquences propres du système. On prendra N=8. Idéalement, on observe 8 pics sur la FFT dont les fréquences attendues sont données par la relation : $f_i=2.f_0|\sin(i.\pi/(2N+2))|$. Représenter $f_i=g(i)$ et ajuster la courbe obtenue. En déduire f_0 et comparer à la valeur attendue ($f_0=1/(2.\pi.\sqrt{L.C})$).

☺ On peut aussi étudier la réponse fréquentielle en wobblant plutôt que de faire la FFT en régime impulsionnel.

■ Notice de la chaîne d'oscillateurs n°40

31.2. Phénomènes de résonance en mécanique

31.2.1. Conditions aux limites et quantification

Étudier la réponse d'une corde de Melde excitée par un vibreur vertical. La corde ne présente des résonances que pour certaines fréquences f_i d'excitation. Cette quantification des fréquences de résonance est due aux conditions aux limites imposées. La théorie prévoit la loi $f_n=(n+1/2).c/2L$. Ajuster la droite $f_n=g(n)$ et en déduire c. Comparer à la valeur $c=\sqrt{T/\lambda}$.



où T est la tension de la corde et λ sa masse linéique.

☺ On peut aussi étudier le comportement analogue d'un câble coaxial en circuit ouvert. Les fréquences de résonances sont alors de l'ordre du MHz.

■ Dictionnaire de physique expérimentale, Tome I, Mécanique, « Ondes stationnaires »

31.2.2. Résonance aiguë : application

On trace la courbe de résonance d'un diapason. Pour cela le diapason est excité à l'aide d'une bobine à laquelle on ajoute un noyau à l'extrémité conique pour concentrer les lignes de champ. La bobine est alimentée via un amplificateur par un générateur basse fréquence réglé sur $f \sim 220\text{Hz}$. L'excitation se fait alors à $f \sim 440\text{Hz}$ car $F \propto B^2$. Le signal d'amplitude V est récupéré par un micro relié à un générateur. Tracer $V = g(f)$ sur une gamme de quelques Hz. Ajuster la courbe de résonance par celle d'un filtre passe bande dont le gain vaut :

$$G(f) = \frac{G_0}{\sqrt{((1 - (f/f_0)^2)^2 + 1/Q^2 * (f/f_0)^2)}}$$

☺ Si on se débrouille bien, l'ajustement par la fonction donnée ci-dessus doit être en accord quasi-parfait avec les résultats expérimentaux.

On obtient un gain de plusieurs milliers. Ce gain élevé traduit une résonance très piquée et une fréquence de résonance très bien définie, c'est le but recherché pour faire un bon diapason.

■ Bulletin de l'union des physiciens n°801

32. Montage n°32 : Couplage des oscillateurs

Des oscillateurs électriques peuvent être couplés de manière capacitive, résistive ou inductive (élastique, par frottement ou par inertie en mécanique). De manière générale les équations qui régissent de tels systèmes font intervenir des couplages (pas forcements linéaires) entre les grandeurs x_i , \dot{x}_i et \ddot{x}_i et les grandeurs x_j , \dot{x}_j et \ddot{x}_j avec $i \neq j$. Lorsqu'on couple N oscillateurs à 1 degré de liberté, il existe alors au plus N modes propres.

32.1. Couplage d'oscillateurs mécaniques

On étudie le couplage de deux oscillateur mécaniques (pendules pesants couplés par un fil de torsion). On mesure la pulsation propre ω_0 d'un pendule couplé l'autre étant bloqué. On mesure ensuite les deux pulsations propres ω_s et ω_a des modes symétriques et antisymétriques. On constate que $\omega_s < \omega_0 < \omega_a$. Vérifier que lorsqu'on excite un des deux pendule, on observe un phénomène de battements. La pulsation des battements est donnée par : $\omega_s = \omega_a - \omega_0$. Le vérifier expérimentalement. Évaluer le coefficient de couplage donné par :

$$\frac{\omega_{s,a}}{\omega_0} = \sqrt{1 \pm C}$$

⚠ Il faut absolument travailler aux petits angles ($\theta < 10^\circ$) pour avoir des résultats corrects

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome I, Mécanique, « Couplage »
- Notice des pendules pesants couplés n°174

32.2. Couplage par mutuelle de deux circuits électriques

Coupler deux bobines en les accolant. Mesurer leur inductance respective L_1 et L_2 . Calculer l'inductance mutuelle M donnée par $u_2 = M \cdot \omega \cdot i_1$. En déduire le coefficient de couplage

$$C = M / \sqrt{L_1 L_2}.$$

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, Électricité, « Circuits couplés »

32.3. Couplage de deux oscillateurs électriques

Réaliser deux circuits LC identiques couplés par inductance mutuelle via les deux bobines (les mêmes que dans l'expérience précédente). Les deux circuits sont alimentés en régime sinusoïdal par une alimentation unique et séparés par deux transformateurs d'isolement. La fréquence propre des circuits est choisie autour de 1kHz. On mesure la tension aux bornes d'un des condensateurs. Effectuer une wobulation autour de 10kHz. Vérifier qu'en l'absence de couplage, il existe une unique pulsation résonante ω_0 , la mesurer. Rétablir le couplage et constater qu'il existe alors deux pulsations résonantes qui vérifient :

$$\omega_{\pm} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 \pm C}}$$

⚠ Les deux circuits électriques doivent être rigoureusement identiques, une méthode imparable pour y arriver est donnée dans la référence ci-dessous, ne surtout pas passer cette étape.

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome IV, Électricité, « Circuits couplés »

32.4. Couplage de N oscillateurs électriques

On utilise une chaîne de N oscillateurs (N variant de 1 à 8) LC couplés. On montre que lorsqu'on couple N oscillateurs, il existe N modes propres caractérisés par N pulsations propres. On affiche ces fréquences à l'aide de la fonction FFT d'un oscilloscope lorsque la chaîne d'oscillateurs est alimenté par un créneau (pour exciter toutes les fréquences).

On peut éventuellement mesurer les fréquences propres du système et les comparer aux valeurs données par la formule de la notice.

☺ On peut aussi étudier la réponse fréquentielle en wobulant plutôt que de faire la FFT en régime impulsionnel.

- Notice de la chaîne d'oscillateur n°40

33. Montage n°33 : Régimes transitoires

Lorsqu'on laisse un système évoluer librement ou soumis à un régime forcé, le régime permanent est précédé d'un régime transitoire. Ce dernier possède un temps caractéristique qui dépend des paramètres du système. En général ce temps est limité par des phénomènes diffusifs ou dissipatifs.

33.1. Régime transitoire et diffusion

En thermodynamique les lois de Fourier (resp. de Fick) stipulent que dès qu'il existe un gradient de température (resp. de concentration) alors un courant de transfert thermique (resp. de particule) tend à rendre le système plus homogène. Dans le cas de la diffusion de particule par exemple de glycérol dans l'eau, la grandeur caractéristique est le coefficient de diffusivité D . On étudie cette diffusion en exploitant le fait qu'un gradient de concentration crée un gradient d'indice optique de n_g (glycérol) vers n_e (eau) susceptible de dévier des rayons lumineux. Cette déviation d'un angle α permet de suivre le phénomène de diffusion dans le temps. La théorie donne :

$$\alpha_{max} = \frac{(n_g - n_e) \cdot d}{2\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}}$$

Tracer $\alpha_{max} = f(1/\sqrt{t})$. De la valeur de la pente, en déduire la valeur de D . Comparer à la valeur tabulée.

☺ Si on utilise un mélange 50%-50% eau-glycérol plutôt que du glycérol pur il faut multiplier l'expression de α_{max} par 1/2.

- Bulletin de l'union des physiciens n°819 (1)
- CRC Handbook 83^{ème} édition (pour la valeur de D)
- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique « Transports (phénomènes de) » **▲ La formule donnée dans cette référence n'est pas adaptée**

33.2. Régime transitoire en électricité

33.2.1. Réponse indicielle d'un circuit RLC

On cherche à caractériser la réponse impulsionnelle d'un circuit RLC série. Faire l'acquisition de l'évolution de la tension aux bornes de la résistance en excitant le système avec un créneau et l'enregistrer sur ordinateur. Ajuster la courbe obtenue par une fonction de la forme :

$$V(t) = V_0 \cdot \cos(2\pi f \cdot (t - t_0)) \cdot e^{-t/\tau} + E$$

En déduire la pseudo-période $T_{pp} = 1/f$ et le décrément logarithmique $\delta = T_{pp}/\tau$ et comparer aux valeurs attendues. Éventuellement étudier les variations de δ avec R . Le régime transitoire est limité par la dissipation par effet Joule dans la résistance.

- Électronique expérimentale, Krob, chapitre 7.3 - Acquisition et traitement des signaux

33.2.2. Limitation des temps de réponse des détecteurs

Alimenter une DEL par un signal numérique (sortie TTL d'un GBF par exemple). Faire passer ce signal dans une fibre optique (optionnel) et le détecter à l'aide d'une photodiode polarisée en inverse en série avec une résistance. On étudie le temps de réponse du dispositif en fonction de la résistance. Montrer que le temps de réponse est limité par les effets capacitifs dans la photodiode qui induisent un régime transitoire ($\tau=RC_{\text{photodiode}}$). Comparer la valeur de $C_{\text{photodiode}}$ à celle de la notice.

- Notice de la photodiode n°602
- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 2.2 – Photodiode

33.2.3. Régime transitoire et asservissement

À l'aide d'un dispositif de régulation de température comportant un bloc de cuivre (conducteur thermique), une thermistance (mesure de la température) et un module Peltier (modification de la température) on illustre le principe de l'asservissement proportionnel et proportionnel-intégral. On montre les limites de chacun de ces modes de régulation. Pour l'asservissement proportionnel, l'erreur statique est non nulle et le transitoire relativement long. Pour l'asservissement proportionnel-intégral, l'erreur statique est nulle et le transitoire plus court mais il existe un dépassement de la consigne.

- Notice de l'ensemble pour l'étude d'une régulation de température n°205
- Électronique expérimentale, Krob, chapitre 9 - Asservissement d'une grandeur physique (pour la théorie)

34. Montage n°34 : Phénomènes de transport

L'énergie peut être transférée d'un lieu à un autre de trois manières différentes : par conduction, par convection et par rayonnement. La matière, elle, peut se déplacer soit par diffusion soit par convection. Ces phénomènes ont des constantes de temps très différentes et leur contribution respective dépend des caractéristiques du système considéré.

34.1. La diffusion/conduction

34.1.1. La diffusion de particules

En thermodynamique les lois de Fourier (resp. de Fick) stipulent que dès qu'il existe un gradient de température (resp. de concentration) alors un courant de transfert thermique (resp. de particule) tend à rendre le système plus homogène. Dans le cas de la diffusion de particule par exemple de glycérol dans l'eau, la grandeur caractéristique est le coefficient de diffusivité D . On

étudie cette diffusion en exploitant le fait qu'un gradient de concentration crée un gradient d'indice optique de n_g (glycérol) vers n_e (eau) susceptible de dévier des rayons lumineux. Cette déviation d'un angle α permet de suivre le phénomène de diffusion dans le temps. La théorie donne :

$$\alpha_{max} = \frac{(n_g - n_e) \cdot d}{2 \sqrt{\pi \cdot D \cdot t}}$$

Tracer $\alpha_{max} = f(1/\sqrt{t})$. De la valeur de la pente, en déduire la valeur de D. Comparer à la valeur tabulée.

☺ Si on utilise un mélange 50%-50% eau-glycérol plutôt que du glycérol pur il faut multiplier l'expression de α_{max} par 1/2.

- Bulletin de l'union des physiciens n°819 (1)
- CRC Handbook 83^{ème} édition (pour la valeur de D)
- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique « Transports (phénomènes de) » **▲ La formule donnée dans cette référence n'est pas adaptée**

34.1.2. La conduction thermique

Un barreau de cuivre est chauffé à l'une de ses extrémités par une résistance (résistance R, tension U). L'autre extrémité est refroidie par un flux d'eau continu. Deux thermocouples éloignés d'une distance d permettent de mesurer la différence de température ΔT entre les deux extrémités. On peut alors remonter à la conductivité thermique λ du cuivre via la relation suivante : $\lambda = d \cdot U^2 / R \cdot S \cdot \Delta T$. Faire cette étude pour différentes valeurs de U et donc de ΔT et ajuster la droite obtenue. Comparer à la valeur tabulée.

Vérifier que le rapport de la conductivité thermique et de la conductivité électrique est conforme à la loi de Wiedemann-Franz.

- Physique de l'état solide, Kittel (pour l'expression de la loi de Wiedemann-Franz)
- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique, « Conduction thermique » (Adaptation)

34.1.3. La conduction électrique

Via une mesure à 4 points mesurer la conductivité électrique d'un enroulement de cuivre de section S et de longueur L, plongé dans un bain thermostaté. La mesure simultanée de la tension et de l'intensité permet de remonter à la résistance et d'en déduire la conductivité $\sigma = L / RS$. Étudier la relation (affine) entre la résistivité et la température, en déduire le coefficient de Matthiessen α du cuivre, comparer à la valeur tabulée.

- CRC Handbook 83^{ème} édition (pour les valeurs de σ et α)

34.2. Le rayonnement

On réalise un corps noir (en première approximation) à l'aide d'un four contenant un corps métallique que l'on peut chauffer à plusieurs centaines de degrés. On y accole un diaphragme refroidi par eau. Le rayonnement émis est capté à l'aide d'une thermopile de Moll reliée à un millivoltmètre. On suppose que la tension délivrée par la thermopile est une fonction linéaire de la puissance reçue. Vérifier la validité de la loi de Stefan-Boltzman : $P_s = \sigma \cdot (T^4 - T_0^4)$.

- Optique expérimentale, Sextant, chapitre 2.4 – Détecteurs thermiques
- Notice de la thermopile de Moll n°80

34.3. La convection

Montrer les phénomènes de convection dans une cuve chauffée par le dessous. Pour cela former l'image de la cuve sur un écran et filtrer les fréquences spatiales nulles dans le plan de Fourier (strioscopie). On visualise alors le phénomène de convection détecté grâce aux variations d'indice optique entre les zones chaudes et les zones froides.

☺ Plus simplement, on peut déposer des gouttes d'encre dans le liquide avant de le chauffer et se passer de la strioscopie.

- Dictionnaire de physique expérimentale, Tome II, Thermodynamique « Convection »

35. Montage n°35 : Moteurs

Les moteurs permettent de convertir de l'énergie électrique, thermique, pneumatique, ... en énergie mécanique. Comme lors de toute conversion d'énergie, celle-ci se fait avec un certain rendement. De plus ce rendement est optimal pour un certain régime appelé « régime nominal ».

35.1. Les moteurs électriques

35.1.1. Le moteur électrique continu

Un moteur électrique est conçu pour avoir un rendement maximal pour une certaine valeur du couple résistant. Ce couple optimal est appelé couple nominal.

Utiliser un moteur électrique pour monter des charges de masses différentes. Mesurer le temps de montée Δt nécessaire pour élever la charge de $h=1\text{m}$. L'énergie fournie par l'alimentation vaut

$E_f = U \cdot I \cdot \Delta t$. U et I sont mesurés à l'aide d'un ampèremètre et d'un voltmètre. L'énergie effectivement reçue par la charge vaut $E_r = m \cdot g \cdot h$. Le rendement vaut alors $\eta = E_r / E_f$.

L'évaluer pour différentes masses et tracer $\eta = f(m)$. En déduire la masse nominale m_n puis le couple résistant nominal $C_n = m_n \cdot g \cdot R$ R étant le rayon de l'axe en rotation autour duquel s'enroule la corde qui entraîne la masse (mesuré au pied à coulisse).

- Notice du moteur à courant continu n°2

36. Le moteur asynchrone

Étudier le couple en fonction du glissement d'un moteur asynchrone triphasé. Tracer la courbe donnant la fréquence de rotation du rotor en fonction du couple résistif.

Évaluer le rendement du moteur en régime nominal et comparer à la valeur gravée sur le moteur. Le moteur est un système inductif, il introduit un déphasage entre le courant et la tension. On caractérise ce déphasage par la quantité $\cos(\varphi)$. La mesurer et la comparer à la valeur gravée sur le moteur.

⚠ Lors de cette expérience les tension utilisées sont élevées (~220V). Prendre les précautions adéquates (utiliser des fils adaptés, débrancher avant de toucher aux branchements, ...)

- Notice du moteur asynchrone triphasé n°488
- Machines électriques, Niard, pages 154 à 186

37. Exemple de moteur thermique : le moteur de Stirling

Étudier le principe de fonctionnement d'un moteur de Stirling. À l'aide d'une carte d'acquisition, tracer le cycle $P=f(V)$ du moteur en régime libre. Évaluer graphiquement les températures des deux isothermes tangentes au cycle expérimental et qui correspondraient au cycle idéal (cycle de Carnot : deux isothermes, deux isochores). En déduire l'énergie maximale que l'on pourrait espérer récupérer sur un cycle et la puissance correspondante connaissant la durée du cycle.

À l'aide des données expérimentales, calculer à l'aide d'une intégrale numérique sur un cycle l'énergie réellement récupérée sur un cycle et la puissance correspondante. En déduire l'écart à l'idéalité du cycle et le facteur multiplicatif qui s'applique alors au rendement idéal (on trouve typiquement $\eta_{réel} \sim 0,8 \times \eta_{idéal}$).

☺ Attention à bien faire l'intégrale sur un cycle entier, ni plus, ni moins sinon la puissance est soit surévaluée soit sous évaluée.

Mesurer T_{chaud} et T_{froid} en insérant deux thermocouples dans les encoches prévues à cet effet. En déduire le rendement idéal (de Carnot) $\eta_{idéal} = 1 - T_{froid}/T_{chaud}$ puis le rendement total (hors pertes thermiques) du moteur de Stirling.

- Notice du moteur de Stirling n°12