

# **Montages de physique**

Hugo Roussille

25 juin 2019

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Dynamique du point et du solide</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Surfaces et interfaces</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Dynamique des fluides</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Capteurs de grandeurs mécaniques</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Mesure de température</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>Transitions de phase</b>	<b>14</b>
<b>7</b>	<b>Instruments d'optique</b>	<b>17</b>
<b>8</b>	<b>Interférences lumineuses</b>	<b>19</b>
<b>9</b>	<b>Diffraction des ondes lumineuses</b>	<b>21</b>
<b>10</b>	<b>Spectrométrie optique</b>	<b>23</b>
<b>11</b>	<b>Émission et absorption de la lumière</b>	<b>25</b>
<b>12</b>	<b>Photorécepteurs</b>	<b>27</b>
<b>13</b>	<b>Biréfringence, pouvoir rotatoire</b>	<b>29</b>
<b>14</b>	<b>Polarisation des ondes électromagnétiques</b>	<b>32</b>
<b>15</b>	<b>Production et mesure de champs magnétiques</b>	<b>34</b>
<b>16</b>	<b>Milieus magnétiques</b>	<b>36</b>
<b>17</b>	<b>Métaux</b>	<b>38</b>
<b>18</b>	<b>Matériaux semi-conducteurs</b>	<b>40</b>
<b>19</b>	<b>Effets capacitifs</b>	<b>42</b>
<b>20</b>	<b>Induction, auto-induction</b>	<b>46</b>
<b>21</b>	<b>Production et conversion d'énergie électrique</b>	<b>48</b>
<b>22</b>	<b>Amplification de signaux</b>	<b>50</b>
<b>23</b>	<b>Mise en forme, transport et détection de l'information</b>	<b>52</b>
<b>24</b>	<b>Signal et bruit</b>	<b>54</b>
<b>25</b>	<b>Mesure des fréquences temporelles (domaine de l'optique exclu)</b>	<b>56</b>
<b>26</b>	<b>Mesure de longueurs</b>	<b>58</b>
<b>27</b>	<b>Systèmes bouclés</b>	<b>60</b>
<b>28</b>	<b>Instabilités et phénomènes non-linéaires</b>	<b>62</b>

<b>29 Ondes : propagation et conditions aux limites</b>	<b>65</b>
<b>30 Acoustique</b>	<b>67</b>
<b>31 Résonance</b>	<b>69</b>
<b>32 Couplage des oscillateurs</b>	<b>72</b>
<b>33 Régimes transitoires</b>	<b>74</b>
<b>34 Phénomènes de transport</b>	<b>76</b>
<b>35 Moteurs</b>	<b>78</b>

# Dynamique du point et du solide

**Fil directeur** Différents points de dynamique : équation du mouvement, translation, rotation, référentiels non galiléens...

## Bibliographie

## Matériel

- Écran blanc, balles (notamment balle de golf), lampe Quartz-Iode
- Caméra rapide
- Plan pour frottement solide, palet en bois avec ficelle, masses, potence + poulie
- Gyroscope

## Introduction

Dans ce montage on illustrera différents points de dynamique :

- Chute libre avec PFD
- Conservation de l'énergie, pertes, portrait de phase
- Rotation d'un solide
- Potentiellement changement de référentiel.

## 1 Dynamique du point : la chute libre

### Expérience

Mesure de  $g$  par ajustement de la position lors de la chute

- Captation vidéo puis traitement par Cinéris
- Lâcher la balle à la main, avec une grande vitesse initiale, et ajuster sur le premier rebond entier.
- Utiliser une balle assez lourde pour négliger les frottements
- On n'aura pas une valeur très précise pour  $g$  : parler des problèmes de précision (parallaxe, etc.)

**Transition :** Forces plus complexes, s'appliquant sur un point matériel mais provenant de la nature solide de l'objet associé. On peut obtenir des résultats en s'intéressant uniquement aux pertes d'énergie.

## 2 Frottements dynamiques

### Expérience

Mesure du coefficient de frottement dynamique bois-bois

- Montrer le dispositif expérimental
- Tracer  $mh = f(md + M(h + d))$  : ajuster par une droite, la pente est  $\mu_c$ .

**Transition :** Nouveaux phénomènes en dynamique du solide : possibilité de rotation.

### 3 Dynamique du solide

#### Expérience

Mesure du moment d'inertie du gyroscope

- Présenter le fonctionnement du gyroscope, et la façon dont la mesure est faite (ce n'est pas clair du tout pour quelqu'un qui découvre la manip...)
- Montrer le mouvement de précession.
- Mesurer la vitesse de rotation pour plusieurs valeurs de  $\Omega$  (une seule face au jury)
- Comparer à la valeur donnée (pas tabulée!)
- Justifier l'approximation gyroscopique en comparant  $I_1\omega$  et  $ma^2\Omega$ .

**Transition :** Spécificité du dispositif étudié : conservation du moment cinétique, donc apparition d'un couple en référentiel non galiléen.

### 4 Dynamique en référentiel non galiléen

Faire qualitativement, seulement si on a le temps...

#### Expérience

Mesure du couple gyroscopique

- Bien expliquer ce que l'on est en train de faire, et que la force est présente *dans le référentiel tournant*
- Placer le dynamomètre, faire une seule mesure.

### Conclusion

Ouvrir sur le couple gyroscopique s'il n'a pas été traité. Sinon, ouvrir sur la mécanique relativiste, notamment pour la physique des particules.

**Fil directeur** Séparation statique/dynamique

**Bibliographie**

**Matériel**

- Générateur à bulles pour Laplace, mélange eau savonneuse
- Lentille de focale 20 cm, lampe QI
- Manomètre différentiel + alim 12 V
- Multimètre numérique (pour différence de pression)
- Plan incliné pour frottement solide + support élévateur
- Jeu de masses pour frottement dynamique, palet de bois
- Potence + noix + tige à trou + tige à poulie, règle en métal (à scotcher sur le plan de bois)
- Cuve à ondes + générateur, oscilloscope, éthanol
- Pied à coulisse numérique

## Introduction

- Surface : frontière entre intérieur et extérieur.
- Interface : frontière entre deux milieux.
- Caractéristiques d'une interface : énergie surfacique, frottements...

## 1 Interfaces statiques

### 1.1 Interface liquide-air

#### Expérience

Mesure de  $\gamma$  d'un mélange eau-tensioactif par loi de Laplace

- Utiliser une lampe QI et une lentille pour projeter la bulle
- Brancher le manomètre de l'autre côté
- Mesurer le grandissement avec un pied à coulisse
- Ajuster  $\Delta p = 4\gamma/R$ . Problème :  $\gamma$  n'est pas tabulé...

**Transition :** Lois phénoménologiques pour décrire les interfaces solides.

### 1.2 Interface solide-solide

#### Expérience

Mesure du coefficient de frottement statique bois-bois

- Incertitudes de type A en mesurant plusieurs fois l'angle de chute
- Montrer que le coefficient ne dépend pas de la surface, montrer la dépendance en masse...
- Utiliser un support élévateur pour contrôler l'angle
- Bien mesurer l'angle avec la bonne partie de la plaque : le bas.

**Transition :** Comportement différent pour une interface dynamique : dans le cas d'une interface solide, le coefficient de frottement change. Dans le cas de l'interface entre fluides déjà vue, le coefficient

de tension de superficielle ne change mais on peut avoir propagation d'une perturbation : une onde de surface.

## 2 Interfaces dynamiques

### 2.1 Interface liquide-air

#### Expérience

Relation de dispersion des ondes de surface

- Faire attention au grandissement!
- Bien laver la cuve à l'éthanol, mesurer le grandissement avec un bout de scotch avant
- Scotcher une règle à la cuve pour faire des mesures fixes.
- Prendre garde à mettre suffisamment d'eau pour vérifier  $\tan(kjh) \simeq 1$ .

### 2.2 Interface solide-solide

#### Expérience

Mesure du coefficient de frottements dynamique bois-bois

- À tester...
- Tracé de  $md + M(h + d)$  en fonction de  $mh$
- Bien montrer qu'on a un coefficient plus faible que le statique.

## Conclusion

Ouvrir sur les interfaces triples (angle de mouillage par exemple).

**Fil directeur** Fluide seul, interaction fluide/matière, puis interactions entre fluides.

**Bibliographie**

**Matériel**

- Dispositif écoulement de Poiseuille (dont éprouvette graduée, chronomètre + balance)
- Vase de glycérine, billes métalliques, lampe QI pour éclairer (+ écran blanc?)
- Caméra rapide / chronomètre
- Cuve à ondes + générateur, oscilloscope, éthanol
- Pied à coulisse numérique

**Remarques**

Il est intéressant d'évaluer le nombre de Reynolds pour chaque expérience.

## Introduction

On va voir toute la richesse des écoulements en dynamique des fluides, décrite par les différentes valeurs de nombres de Reynolds. On va étudier un écoulement où la viscosité est importante pour une raison « géométrique », puis un écoulement où la viscosité a une importance plus profonde. Enfin nous étudierons la dynamique de l'interface entre fluides, où les forces en jeu font apparaître la capillarité.

## 1 Écoulement d'un fluide

### Expérience

Mesure de la viscosité de l'eau à l'aide de l'étude d'un écoulement de Poiseuille.

- Vérifier l'horizontalité avec un niveau, et s'assurer qu'il n'y a pas de  $\Delta p$  à débit nul.
- Présenter le dispositif, ce qui est à l'origine du gradient de pression.
- Justifier que la longueur d'établissement du profil est faible devant la longueur à laquelle on mesure la pression :  $\delta \propto \sqrt{\nu t}$ , longueur  $l = Ut = U\delta^2/\nu$  et le régime permanent est atteint pour  $\delta = R$ .
- Montrer les tubes qui permettent de calculer la différence de pression
- Un point face au jury, ajustement.

**Transition :** Autre écoulement contrôlé par la viscosité, mais cette fois car le nombre de Reynolds est très petit devant 1.

## 2 Mouvement dans un fluide



### Expérience

Mesure de la viscosité de la glycérine à l'aide de la mesure de la force de frottements.

- Balle assez lourde, la lâcher direct dans la glycérine, vérifier qu'on a bien un régime permanent.
- Mesurer le rayon au pied à coulisse, estimer le nombre de Reynolds.
- Ajustement avec plusieurs rayons. Faire une grosse bille face au jury afin d'être sûr d'avoir atteint le régime permanent.
- Si on a un problème avec Cinéris, utiliser un chronomètre!

**Transition :** Mesure d'un autre paramètre caractéristique d'un fluide.

## 3 Interface entre deux fluides

### Expérience

Mesure de  $\gamma$  de l'eau à l'aide de l'étude des ondes de surface

- Présenter la cuve à ondes, l'existence d'un grandissement.
- Expliquer pourquoi on peut négliger  $\tanh(kh)$ , s'assurer qu'il y a assez d'eau.
- Expliquer pourquoi on ajuste  $\frac{\omega^2}{k}$  et  $k^2$ .
- Utiliser le générateur d'ondes planes?
- Discuter de la valeur obtenue.

Si on a le temps, il pourrait être sympa de mesurer  $\rho_{\text{air}}$  à l'aide de la soufflerie... Mais la manip ne fonctionne pas très bien.

## Conclusion

Ouvrir sur les écoulements turbulents, domaine majeur de la recherche, etc.

**Fil directeur** Caractéristiques de capteurs variés.

## Bibliographie

[1] Georges ASCH et al. *Les capteurs en instrumentation industrielle*. Dunod, 2017.

## Matériel

- Dispositif effet Doppler + GBF + Oscilloscope
- Accéléromètre + voltmètres (\*2) + oscilloscope
- Jauge de contrainte + Multimètre (moderne) + règle, potence, porte-plaque

## Remarques

Dans ce montage, on doit insister sur les *capteurs* et non les grandeurs mécaniques. Il faut donc étudier la sensibilité, la fidélité, la gamme, la linéarité, la résolution...

## Introduction

Définition d'un capteur : il convertit une grandeur mécanique en une grandeur mesurable. Un transducteur convertit une grandeur physique en une autre grandeur, pas forcément mesurable. On va s'intéresser à différentes caractéristiques des capteurs : sensibilité, gamme, linéarité, précision...

## 1 Mesure de vitesse

### Expérience

Effet Doppler par détection synchrone

- Résolution : résolution de la FFT ou nombre de périodes qu'on regarde pour mesurer la fréquence.
- Gamme : fréquence de coupure du passe-bas.
- Le capteur est l'ensemble de tous les appareils!

## 2 Mesure d'accélération

### Expérience

Étude de l'accéléromètre

- Vérification de la loi physique donnant l'accélération.
- Précision : discuter la fidélité et la justesse
- Gamme : saturation au-delà de  $4g$ .
- Tracer  $a_y$  en fonction de  $R^2\omega$ , on veut une droite de pente 1.

## 3 Capteur de contrainte

### Expérience

Jauge de contrainte

- Remonter au facteur de jauge tabulé
- On peut avoir de légers décalages dus à des déformations irréversibles.

### Conclusion

On peut étudier les mêmes propriétés à des capteurs non mécaniques : par exemple de température. On peut aussi voir qu'à chaque situation correspond un capteur.

### Remarques

Voir [1] pour des définitions précises.

# 5 Mesure de température

**Fil directeur** Illustrer différents capteurs, leurs propriétés et les gammes de température pour lesquelles ils sont adaptés.

## Bibliographie

## Matériel

- Résistance à fil de platine
- Thermistance
- Azote liquide, vases Dewar, plaque chauffante, béchers + agitateur
- Cristalliseur + glace
- Dispositif point triple de l'azote (grosse cuve + moteur)
- Dispositif corps noir (four + thermocouple + thermopile + nanovoltmètre)

## Remarques

À propos de la nouvelle échelle de températures : « While the 2018 definition of the kelvin in terms of the Boltzmann constant has no immediate impact on the status of the ITS-90 and the PLTS-2000, there are significant benefits, particularly for temperature measurements below  $\sim 20$  K and above  $\sim 1300$  K, where primary thermometers may offer a lower thermodynamic uncertainty than is currently available with the ITS-90 and the PLTS-2000.

In the future, as the primary methods evolve and are expected to achieve lower uncertainties, primary thermometers will become more widely used and gradually replace the ITS-90 and the PLTS-2000 as the basis of temperature measurement. ».

## Introduction

- Mesure de température importante, mais difficile : comportement complexe dans une grande gamme de températures.
- Nouvelle définition en mai 2019, en fixant la valeur de la constante de Boltzmann.

## 1 Mesure relative : pyromètre optique

### Expérience

Vérification de la loi de Stefan au pyromètre optique

- Ne pas oublier d'enlever le cache de la pile de Moll!
- Prendre les points en montée, afin que ce soit reproductible face au jury
- Bien mesurer  $T_{\text{amb}}$  pour vérifier que ça ne bouge pas trop
- Cette manip ne fonctionne pas très bien, on peut à la limite faire l'ajustement en fixant le 4 et en regardant le  $\chi^2$

## Remarques

On peut aussi voir cette expérience comme appartenant à la catégorie « mesure de température à distance », et la placer en second.

**Transition :** Problème d'une mesure relative : on doit connaître la température de la pièce, et on voit que c'est source de beaucoup d'incertitudes.

## 2 Mesure absolue : étalonnage d'un capteur

### Expérience

Étalonnage de la résistance à fil de platine

- Prendre quatre températures : eau gelée, eau bouillante, point triple de l'azote, azote bouillant
- Cela permet d'introduire les difficultés de mesure absolue de température : nécessite d'un point fixe, etc.
- Prendre toutes les valeurs face au jury
- Ajustement par  $R(T) = R_0(1 + aT + bT^2)$ , comparaison à la notice
- Montrer que dans l'air (qui conduit mal la chaleur) l'effet Joule réchauffe la résistance...

**Transition :** Capteur qui permet certes de mesurer de nombreux  $T$ , mais varie très peu. On veut plutôt des capteurs sensibles sur la plage de températures qui nous intéresse.

## 3 Sensibilité d'un capteur : la thermistance

### Expérience

Étude de la thermistance

- Étalonner dans un bain de température variable
- Remonter à l'énergie de gap par l'ajustement  $R(T) = A \exp(-B/T)$ .
- Noter que  $R$  varie bien plus vite que pour le fil de platine : on a une meilleure sensibilité.

## Conclusion

Ouvrir sur les très nombreux thermomètres, utiles pour des mesures différentes (par exemple, grande précision sur petit domaine ou précision correcte sur grand domaine). Noter que la mesure perturbe toujours l'équilibre thermique...

**Fil directeur** L'ordre des transitions

### Bibliographie

- [1] Michel FRUCHART et al. *Physique expérimentale : Optique, hydrodynamique, mécanique et thermodynamique*. Deboeck supérieur, 2016.
- [2] J.-P. GAUTHIER, A. DEGUIN et R. BALDY. « Appareil d'enseignement pour l'étude des propriétés des fluides au voisinage du point critique ». In : *Bulletin de l'union des physiciens* 589 (1976).
- [3] P.J. LINSTROM et W.G. MALLARD. *NIST Chemistry WebBook. NIST Standard Reference Database Number 69*. National Institute of Standards et Technology, Gaithersburg MD, 2019.
- [4] Whitney H. MEARS, E. ROSENTHAL et Joseph V. SINKA. « Physical properties and virial coefficients of sulfur hexafluoride ». In : *The Journal of Physical Chemistry* 73.7 (juil. 1969), p. 2254-2261. DOI : [10.1021/j100727a026](https://doi.org/10.1021/j100727a026). URL : <https://doi.org/10.1021/j100727a026>.

### Matériel

- Dispositif étain solide (chauffage électrique, thermocouple, carte d'acquisition)
- Isothermes de SF<sub>6</sub>
- Calorimètre + chauffage diazote + balance
- Dispositif température de Curie

## Introduction

- Transition de phase : changement « brusque » des propriétés d'un système
- Différentes transitions de phase en fonction de la variable d'état qui est discontinue.

## 1 Diagramme de phase du corps pur

Montrer le diagramme sur l'écran : on va étudier chaque branche, qui correspond à chaque fois à une transition différente.

### 1.1 Interface solide-liquide

#### Expérience

Équilibre solide-liquide pour l'étain

- Chauffer (chauffage électrique) avant le début du montage pour lancer le refroidissement au début
- Ne traiter les données qu'à la fin, en revenant sur cette manip.
- Bien retirer l'oxyde
- Montrer la courbe de refroidissement de préparation ?
- Surfusion, palier en température car équilibre monovariant

### 1.2 Interface liquide-vapeur

**Expérience**

Isothermes de l'hexafluorure de soufre [1, 2] :

- Montrer la coexistence des deux phases, la forme du ménisque
- Prendre quelques points à  $T \simeq 35^\circ\text{C}$  devant le jury, bien montrer le palier, en attendant pas si longtemps (on n'a pas le temps)
- Reste de la courbe : préparation
- Prendre un point de  $P_{\text{sat}}$  proprement en attendant longtemps.
- Obtenir  $L_v$  avec un ajustement de  $P_{\text{sat}}(T)$

**Attention**

- Il faut attendre longtemps entre les points, car il y a des échanges thermiques avec le milieu! On ne peut pas montrer beaucoup de mesures face au jury.
- Il faut évaluer  $L_{\text{vap}}$  au milieu de la plage de mesures en température, donc non pas à  $25^\circ\text{C}$  mais plutôt vers  $32^\circ\text{C}$ . On peut alors obtenir une valeur excellente...

**Remarques**

- Les données tabulées sont présentes dans [4, 3]. Pour [3], on a les données dans « Fluid properties » et « Phase change data ». Ces références sont très utiles pour comparer les valeurs de  $P_{\text{sat}}$  aux données tabulées, obtenir la valeur de  $L_{\text{vap}}$  à la température que l'on souhaite, et obtenir des valeurs pour  $v_g$  et  $v_l$ .
- Il semblerait que l'hexafluorure de soufre ne soit plus très pur, car même en attendant très longtemps on n'obtient pas de palier (la courbe remonte aux bas volumes).

**Transition :** Pour mesurer  $L_v$  plus précisément

**Expérience**

Chaleur latente de vaporisation de l'azote

- Prendre des points pour plusieurs puissances, trouver la pente à chaque fois.
- S'assurer qu'on part en gros de la même masse d'azote tout le temps (pour la poussée d'Archimède).
- Ajustement de  $\frac{dm}{dt}$  en fonction de  $\mathcal{P}$ , remonter à la chaleur latente
- Bien remarquer que l'ordonnée à l'origine correspond aux pertes à puissance nulle.

**Transition :** Si on voulait faire la dernière courbe du diagramme, on pourrait regarder la sublimation du dioxyde de carbone qui se trouve dans les extincteurs lorsqu'il est libéré. Là on va voir des transitions au niveau des propriétés microscopiques de la matière, qui sont désormais d'ordre 2.

## 2 Propriétés magnétiques de la matière

### 2.1 Transition ferromagnétisme-paramagnétisme

**Expérience**

Transition ferromagnétique-paramagnétique du fer

- Mesurer  $T_C$  en montée.

## Conclusion

On a vu de nombreuses transitions, qu'on peut toujours caractériser par un diagramme de phase. On pourrait aller plus loin dans l'universalité et s'intéresser aux paramètres d'ordre pour chaque transition et aux exposants critiques.

### Remarques

- La transition supra est d'ordre 2, mais d'ordre 1 lorsqu'il y a un champ  $\vec{H}$  extérieur.
- Il existe de rares matériaux « supraconducteurs ferromagnétiques », dont le diagramme de phases ferro-para contient aussi une zone supra. Il faut pour cela que l'aimantation en ferro soit plus faible que le champ critique supra  $H_c$



**Fil directeur** Construction d'instruments, et les limites qui apparaissent.

## Bibliographie

[1] SEXTANT. *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.

## Matériel

- Grosse lentille
- Lentille non corrigée (pour aberration chromatique), filtres rouge vert bleu
- Lampe Quartz-iode (\*3), condenseurs 8 cm, 12 cm et 15 cm
- Banc optique, lentilles (20cm \* 2, 10cm \* 2, 15cm \* 1, 50cm \* 1)
- Grille diffusante
- Objectif appareil photo

## Introduction

Nombreux paramètres à prendre en compte dans la conception : limitations de l'idéalité des composants utilisés, grossissement/grandissement, profondeur de champ... En fonction du but de l'instrument considéré, on ne joue pas sur les mêmes paramètres.

## 1 Aberrations des lentilles

### Expérience

Aberration sphérique d'une lentille ([1] p 38)

- Utiliser la grosse lentille
- On peut faire passer le faisceau dans une cuve avec du lait en poudre.

### Expérience

Aberrations chromatiques d'une lentille ([1] p 41)

- Utiliser la petite lentille non corrigée
- Pouvoir dispersif

**Transition :** En ayant ces limitations en tête, on peut construire des instruments d'optique. Mentionner la limitation par diffraction.

## 2 Lunette astronomique

### Expérience

Grossissement d'une lunette astronomique

- On peut la construire en entier devant le jury. Il faut cependant bien mesurer toutes les focales au départ.
- Monter le dispositif, montrer les diaphragmes de champ et d'ouverture, mesurer le grossissement.
- Fixer l'ensemble {il + écran} à l'aide d'une pince.
- Bien faire attention à l'orientation des lentilles et au parallélisme.
- Montrer l'importance des diaphragmes de champ et d'ouverture.

**Transition :** Rôle du diaphragme de champ : très important pour les appareils réels tel que celui que l'on va étudier maintenant.

## 3 Objectif d'appareil photo

### Expérience

Influence de l'ouverture sur la luminosité et la profondeur de champ ([1] p 34)

- dépendance en  $N$  de la luminosité, de la profondeur de champ.

## Conclusion

Correction des aberrations : c'est le « nerf de la guerre » de l'astronomie, etc. Nouvelles techniques non optiques en microscopie.

**Fil directeur** Conditions d'obtention, et mesures précises que les interférences permettent de réaliser.

**Bibliographie**

**Matériel**

- Laser (polarisé)
- Caméra CCD Mightex
- Lampe Philora HP (\*2), lampe Quartz-Iode, lampe à vapeur de sodium
- Condenseurs 8cm, 12cm, 15cm
- Lentilles : 10cm (\*2), 20cm, 15cm, 50cm, 1m
- Filtre interférentiel 546 nm
- Bifente [N163], fente réglable
- Règle métallique
- Interféromètre de Michelson

## Introduction

Les conditions d'obtention sont strictes, voyons comment on peut le montrer expérimentalement.

## 1 Interférences à deux ondes

### Expérience

Fentes d'Young

1. Au laser, ajustement de la figure d'interférences.
  - Caméra CCD : faire cette acquisition dès le début, sans toucher quoi que ce soit.
  - Ajustement :

$$I = I_0 \operatorname{sinc}^2 \left( \frac{\pi b(x - x_0)}{\lambda D} \right) \times \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi a(x - x_0)}{\lambda D} \right) \right]$$

Fixer les paramètres :  $\lambda$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $D$ . Libérer peu à peu.

2. Lampe Philora HP + filtre interférentiel
  - Non-localisation des franges.
  - Condenseur 15 cm, fente accolée, Lentille 15 cm puis bifente et écran.
  - « Cohérence spatiale » (soit on élargit la source, soit on déplace les fentes).

**Transition :** Comment utiliser des sources larges tout de même, sans avoir de pertes de contraste?

## 2 Interférométrie à division d'amplitude

### Expérience

Interféromètre de Michelson en lame d'air

- Expliquer le fonctionnement du Michelson : celui-ci est déjà réglé. Montrer qu'on n'a pas de perte de contraste par cohérence spatiale. Parler des conditions d'observation.
- Mettre une lampe au sodium, repérer le contact optique.
- Ajuster les rayons des anneaux
- Application à la spectroscopie : montrer les annulations du doublet du mercure, remonter au doublet par ajustement.

**Transition :** Comment évaluer la cohérence temporelle pour une source donnée ?

### Expérience

Interféromètre de Michelson en coin d'air

- Étalonner le coin d'air en lumière monochromatique (sodium)
- Passer en lumière blanche : repérer la perte du contraste, en déduire la longueur de cohérence.

## Conclusion

Ouvrir sur l'interférométrie de précision dans LIGO et Virgo et la cohérence de polarisation (Fresnel-Arago).

**Fil directeur** Profils de diffraction classiques : propriété générale de transformée de Fourier et utilisation d'une telle propriété.

### Bibliographie

- [1] Clément SAYRIN. *Travaux dirigés d'Optique*. URL : <http://www.lkb.upmc.fr/cqed/teaching/teachingsayrin/>.
- [2] SEXTANT. *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.

### Matériel

- Laser (polarisé) (\*2) + élargisseur de faisceau
- Fente calibrée 100  $\mu\text{m}$  (ENS 4307, N170)
- Caméra CCM Mightex + filtres densité
- Fente réglable (\*3) + théorème de Babinet
- Lampe Philora HP + lampe QI
- Condenseurs 8cm, 12cm, 15cm
- Lentilles : 10cm (\*2), 20cm, 25 cm, 1m + écrans
- Filtre interférentiel 546 nm
- Réseau 3000 traits/cm (ENSP 3639)
- Règle métallique
- Diaphragme tout petit
- Grille (diffusante?) expérience d'Abbe

## Introduction

Comment se comportent les rayons lumineux lorsqu'ils rencontrent des objets de taille comparable à leur longueur d'onde? On quitte les limites de l'optique géométrique.

## 1 Diffraction par une fente

### Expérience

Diffraction par une fente rectangulaire

- Suivre le montage de [2] page 109, mais ne mettre que l'élargisseur
- Préciser pourquoi on est bien dans les conditions de Fraunhofer.
- Qualitativement : variation de l'épaisseur de la fente, théorème de Babinet, translation de la fente diffractante.
- Acquisition à la CCD (avec filtre de densité!), puis ajustement par un sinus cardinal au carré.
- Remonter à la largeur de la fente (donc bien utiliser une fente étalonnée).

**Transition :** Que se passe-t-il pour plusieurs fentes?

## 2 Diffraction par $N$ fentes

### Expérience

Formule des réseaux

- Lampe mercure haute pression
- Montrer que si on change le pas du réseau on change la distance entre les pics, et que pour séparer les ordres il faut des réseaux avec un pas faible.
- Lentille de projection de grande focale (1 m environ) afin d'avoir des pics bien séparés.
- Faire bien attention aux mesures des distances et au parallélisme.
- Tracer  $\sin \theta_p$  en fonction de  $p$  pour la raie verte (la plus lumineuse).
- Parler de l'inversion des trois échelle de longueur (voir [1]).

**Transition :** Peut-on tirer profit de l'opération de transformée de Fourier réalisée par la diffraction?

## 3 Diffraction pour le filtrage spatial

### Expérience

Expérience d'Abbe ([2] page 129)

- Faire un beau schéma au tableau.
- Plutôt utiliser une lampe QI : c'est plus impressionnant, mais on voit un peu moins bien. Si ça ne fonctionne pas en préparation, laser élargi.
- Diaphragme le plus petit possible
- Bien montrer le plan de Fourier et les fréquences que l'on coupe

### Remarques

Cette expérience est qualitative, mais elle est vraiment superbe... Inutile de passer trop de temps dessus, mais il faut bien l'expliquer.

## Conclusion

Ouvrir sur la limite de résolution des instruments optiques, et comment la contourner. Cas de l'Event Horizon Telescope, qui utilise plusieurs télescopes pour améliorer la diffraction.

**Fil directeur** Les deux types de spectrométrie

**Bibliographie**

**Matériel**

- Réseau ENSP 3639
- Écrans (sur pied) + grand écran. Miroirs.
- Lampe Philora HP (\*2), lampe Balmer, lampe à vapeur de sodium
- Laser (polarisé)
- Condenseurs 8cm, 12cm, 15cm
- Interféromètre de Michelson
- Lentilles : 10cm (\*2), 20cm, 15cm, 50cm, 1m
- Filtre interférentiel 546 nm
- Règle métallique

**Remarques**

Ce montage est un peu l'équivalent optique du montage sur les capteurs de grandeurs mécaniques : on étudie les spectromètres. Il faut donc s'intéresser aux détails techniques, tels que la précision, etc. On doit aussi calculer les incertitudes proprement.

## Introduction

Comment utiliser les spectromètres pour étudier les profils de raies des sources utilisées ? On va d'abord utiliser des appareils dispersifs, puis utiliser les interférences pour remonter aux raies.

**Transition :** Deux méthode : dispersive si les longueurs d'onde sont éloignées, interférométrique si elles sont proches

## 1 Spectrométrie dispersive

### Expérience

Spectre de la lampe de mercure au réseau

- Montrer les raies initialement au PVD, qualitativement
- Montage réseau éclairé en incidence parallèle et normale, projection sur un écran. Tout doit être bien parallèle, et les longueurs précises. Utiliser un miroir, etc.
- Ajuster  $\sin \theta_p$  en fonction de  $p$  : remonter au nombre de traits par unité de longueur.
- Noter qu'on peut avoir un résultat différent de la valeur tabulée, car les mesures réalisées sont très précises. Cela pourrait s'expliquer par une dilatation thermique, un mauvais étalonnage...

**Remarques**

On peut dire que le goniomètre est plus adapté pour la vérification de la loi des réseaux. Cependant, cette méthode possède plusieurs avantages :

- Elle est très rapide à mettre en place.
- Elle est bien plus visible
- Elle met tout de même en avant de bonnes compétences expérimentales : image nette, système aligné...
- Pour une distance lentille-écran de 1 m, la précision en mesure sur l'écran étant  $u(x) = 1$  mm environ, on a une incertitude  $u(\theta) \simeq u(\tan\theta) = u(x)/1 \text{ m} = 0^\circ 3' 30''$ . La précision du goniomètre est quant à elle de  $0^\circ 1' 0''$ . La différence n'est donc pas trop importante, et on obtient une très belle droite. Il faut cependant être précis sur la distance lentille-écran, qui est une source importante d'incertitude.

**Transition :** Peut-on utiliser le même principe de façon un peu plus systématique ?

### Expérience

Mesure de la constante de Rydberg à l'aide d'un spectromètre USB.

- Expliquer comment fonctionne (assez brièvement) la lampe. Préciser que c'est du deutérium (avantage : ça ne s'échappe pas par rapport à l'hydrogène!).
- Expliquer le principe, pourquoi c'est un fonctionnement dispersif.
- Choix de la fibre optique. Être conscient des limites en résolution.
- Bien expliquer ce qu'on prend comme incertitude : par exemple la largeur à mi-hauteur.
- Donner l'origine des raies supplémentaires qu'on observe.
- Remonter au Rydberg par mesure et ajustement des quatre raies de l'hydrogène dans le visible.

**Transition :** Limite de résolution importante : si deux longueurs d'onde sont proches on ne peut pas les distinguer. Pour illustrer ce fait, montrer le doublet du sodium au spectromètre USB, qui n'est pas résolu.

## 2 Spectrométrie par interférométrie

### Expérience

Mesure de la largeur du doublet du sodium au Michelson en lame d'air

- Expliquer le montage du Michelson en lame d'air face au jury. Le Michelson doit être déjà réglé.
- Trouver le contact optique et montrer les annulations de contraste.
- Prendre tous les points face au jury, réaliser l'ajustement.

## Conclusion

On caractérise la source via l'étude de la lumière qu'elle émet, et il faut choisir l'instrument de mesure en fonction des propriétés de celle-ci. Importance en astrophysique : décalage vers le rouge, etc.



**Fil directeur** Propriétés des sources à partir de leur spectre.

### Bibliographie

- [1] Michel FRUCHART et al. *Physique expérimentale : Optique, hydrodynamique, mécanique et thermodynamique*. Deboeck supérieur, 2016.
- [2] Clément SAYRIN. *Travaux dirigés d'Optique*. URL : <http://www.lkb.upmc.fr/cqed/teaching/teachingsayrin/>.
- [3] SEXTANT. *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.

### Matériel

- Écrans (sur pied) + grand écran. Miroir.
- Potence + tige à trous/pince trois doigts (pour la fibre)
- Règle métallique
- Lampe Philora HP (\*2), lampe Balmer
- Spectrophotomètre USB.
- Illuminateur + monochromateur
- Phosphore de gallium GaP
- Photodiode (auto-alimentée) \*2
- Oscilloscope + câbles
- Condenseurs 8 cm, 15 cm
- Laser (polarisé)
- Interféromètre de Michelson
- Lentilles : 10 cm (\*2), 65 cm, 1 m
- Filtre interférentiel 546 nm

## Introduction

Comment relier les propriétés des sources et des matériaux absorbants à leurs spectres d'émission et d'absorption? On va voir le cas de l'émission ou de l'absorption par un profil discret de raies, puis nous étudierons les semiconducteurs : ceux-ci possèdent un spectre continu et on fera donc apparaître une énergie de gap.

## 1 Émission de lumière

### Expérience

Mesure du spectre d'émission de l'hydrogène, obtention de la constante de Rydberg ([1] p 352)

- Lampe de Balmer : expliquer comment elle fonctionne (c'est du deutérium, dont l'avantage est qu'il ne s'échappe pas contrairement à l'hydrogène).
- Montrer initialement au PVD
- Les raies observées dans le visible proviennent des transitions  $2 \leftrightarrow m$ .
- Placer le spectro USB, faire l'acquisition et mesurer les pics. Faire attention au choix de la
- Comparer aux  $\lambda$  de la série de Balmer, ajuster pour remonter au Rydberg.
- Remarquer qu'un certain nombre de raies proviennent d'autres éléments.

**Remarques**

Bien lire la notice du spectro USB et [1] pour savoir expliquer son fonctionnement. Essentiellement, c'est comme un monochromateur.

**Transition :** On observe que les raies ne sont pas des pics de Dirac, mais qu'elles ont une largeur propre. Celle-ci est due à de nombreux effets, on peut décider de la quantifier en utilisant un dispositif optique de précision : le Michelson.

**Expérience**

Mesure de la largeur de raie du mercure à l'interféromètre de Michelson ([3] p 240)

- Interféromètre déjà réglé en préparation
- Placer la lampe, les lentilles, le filtre interférentiel, expliquer ce qu'il se passe
- Mesurer le contraste en faisant tourner le moteur pendant une faible durée. On s'attend à ([2]) :

$$\mathcal{C}(x) = \exp\left(-\pi\Gamma \frac{a|x|}{cD}\right).$$

- On doit faire attention à avoir une tension élevée et pas de mélange d'anneaux sur la photodiode.

**Transition :** Spectres en absorption de l'hydrogène ou du mercure : on a des raies. Pour un solide, c'est des bandes, c'est ce qu'on va voir!

**2 Absorption de lumière****Expérience**

Mesure du gap de GaP au monochromateur

- Présentation du dispositif
- Montrer rapidement au PVD qu'on a absorption à partir d'un certain  $\lambda$ .
- Faire l'acquisition au monochromateur avec moteur + photodiode, pendant 4 minutes face au jury (avoir fait le spectre sans en préparation). Idéalement, on commence par lancer cette étape, puis on explique le reste.
- Obtenir la valeur du gap
- Discuter sur le fait qu'on ait pas un Heavyside directement (structure compliquée des bandes).
- Si pas le temps, le faire seulement à l'il en repérant la longueur d'onde d'extinction, ou mieux le faire avec la photodiode.

**Conclusion**

Processus met en avant des raies, des changements abrupts, mais on a élargissement des raies. Parler d'autres processus : fluorescence, émission stimulée. Ouverture sur les processus non optiques comme le corps noir.

**Fil directeur** Fonctionnement et propriétés de différents capteurs, les relier à leur principe et aux matériaux les composant.

### Bibliographie

- [1] *Détecteur pyroélectrique*. 539.  
 [2] SEXTANT. *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.

### Matériel

- Illuminateur + monochromateur → QI + filtres interférentiels
- Photorésistance
- Photodiode (non alimentée) + Alimentation stabilisée
- Boîte à décades ( $R$ ), transformateur d'isolement
- Câbles, câbles, câbles
- Lampe QI + condensateurs 12 cm et 15 cm
- Filtre anti-thermique, polariseurs (\*2)
- Multimètres (modernes) (\*2)
- Oscilloscopes (\*3)
- Hacheur optique + Pyroélectrique
- Cellules solaires (différents types)
- Thermopile de Moll
- lame semi-réfléchissante (du Michelson de poche)

## Introduction

- Définition de photorécepteur ([2] p 57)
- Deux types (photoniques et thermiques), discuter les différences.
- On va étudier leurs caractéristiques en tant que capteurs : linéarité, réponse spectrale...

## 1 Fonctionnement d'un photodétecteur

### Expérience

Caractéristique de la photodiode ([2] p 63)

- Faire le montage soi-même (ne pas utiliser la photodiode toute prête)
- Mettre un transfo d'isolement et utiliser les « Invert » de l'oscillo pour s'affranchir de la résistance
- Visualiser la courbe avec Offset
- Courant d'obscurité  $I_S \approx 1 \text{ nA}$ , négligeable.

### Expérience

Vérification de la linéarité de la photodiode

- Ne pas utiliser un laser, dont l'intensité est fluctuante.
- Utiliser polariseur/analyseur croisés puis tracer  $I(\cos^2 \theta)$
- Vérifier qu'on est en régime linéaire si  $U_R$  est proportionnel à  $R$

**Transition :** La linéarité ne fait pas tout, on veut l'utiliser pour étudier une source donc on doit s'affranchir de sa réponse spectrale.

## 2 Réponse spectrale d'un photodétecteur

### Expérience

Réponse spectrale de la photorésistance ([2] p 73, 83)

- Utiliser l'illuminateur/monochromateur avec moteur
- Faire le spectre avec pyro ([1], pour avoir le spectre d'émission de l'illuminateur) et de la photorésistance en même temps avec une lame semi-réfléchissante

**Transition :** Dans le cas d'un photodétecteur utilisé pour produire de l'énergie on veut en plus des propriétés précédentes, qui sont assez secondaires, s'assurer que son rendement est bon.

## 3 Rendement d'un photodétecteur

### Expérience

Rendement de la cellule photovoltaïque ([2] p 85)

- Bien placer la photopile et la cellule au même endroit
- Possibilité d'ajuster la caractéristique

## Conclusion

Ouvrir sur les autres caractéristiques que l'on n'a pas eu le temps de discuter dans ce montage, et qui permettent aussi de choisir un photorécepteur pour un usage particulier : temps de réponse, stabilité...

**Fil directeur** Comment étudier des milieux cristallins biréfringents ?

### Bibliographie

[1] SEXTANT. *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.

### Matériel

- Ensembles de lames pour étude de la polarisation (ENSP 3636, etc.)
- Prisme à Vision Directe
- Spectrophotomètre USB
- Compensateur de Babinet
- Lampe Quartz-iode, condenseur 12 cm
- Fente réglable
- Lentilles : 10 cm (\*2), 20 cm, 15 cm, 50 cm, 1 m
- Papier millimétré
- Électroaimant (le plus gros possible)
- Verre flint lourd pour effet Faraday

## Introduction

Certains matériaux ont des propriétés optiques particulières vis-à-vis de la polarisation de l'onde incidente. On distingue deux phénomènes :

- la biréfringence, correspondant à des indices optiques différents selon la polarisation de l'onde incidente (propriété de milieux anisotropes) ;
- l'activité optique, propriété d'un milieu de faire tourner la direction de polarisation de l'onde incidente (propriété notamment de milieux chiraux).

### Remarques

Lors de ce montage il est préférable de tout monter devant le jury.

## 1 Biréfringence

### 1.1 Mesure de l'épaisseur $e\Delta n$ d'une lame épaisse

#### Expérience

Spectre cannelé au spectrophotomètre USB ([1] p 290) :

- Commencer par montrer au prisme à vision directe
- Régler l'orientation de la lame pour avoir un contraste maximal
- Étude quantitative au spectrophotomètre USB ensuite
- Formule de [1] pour remonter à  $e\Delta n$  : mesurer deux  $\lambda$ .

### Remarques

- On peut le voir, comme avec le Babinet, comme des interférences : les deux « ondes » qui interfèrent sont les projections du champ incident suivant deux directions orthogonales, et

celles-ci interfèrent en étant réunies par l'analyseur.

- Erreur : on ne trouve pas exactement l'épaisseur donnée sur la lame. Explication possible : axe pas exactement parallèle à la face d'entrée?

**Transition :** Impossible d'étudier une lame mince avec cette méthode car il n'y aura qu'une seule cannelure.

## 1.2 Mesure pour une lame mince

### Expérience

Compensateur de Babinet ([1] p 292) :

- Tout monter à partir du montage précédent (seule la source est inchangée).
- Expliquer le principe, par analogie avec le Michelson en coin d'air : au lieu de deux chemins physiques différents, on sépare « virtuellement » les deux ondes avec un polariseur, elles parcourent un chemin optique différent grâce au Babinet, et on les recombine avec un analyseur.
- L'utilisation est tout à fait analogue à la mesure de l'épaisseur d'une lame avec un Michelson :
  - En lumière monochromatique, montrer les franges et mesurer l'interfrange.
  - En lumière blanche, mesurer le décalage lorsqu'on ajoute la lame.
- Obtenir l'épaisseur  $e\Delta n$  directement avec ces deux mesures : pas besoin de mesurer le grandissement ou quoi que ce soit.
- Parler de biréfringence induite (effet Kerr, etc.)
- La frange centrale est sombre car en l'absence de déphasage on est en configuration polariseur/analyseur croisés.

### Remarques

Compensateur de Babinet :

- Étalonnage en lumière monochromatique
  - Action identique à celle d'un Michelson en coin d'air
  - Contraste maximal si les axes neutres sont à  $45^\circ$  de la polarisation incidente
  - Déphasage  $\frac{2\pi}{\lambda_0} 2\alpha x \Delta n_B$
  - Interfrange telle que

$$\frac{i}{\gamma} = \frac{\lambda}{2\alpha\Delta n_B}$$

- Mesure en lumière blanche
  - On ajoute la lame dont on recherche l'épaisseur
  - Ses axes doivent être parallèles à ceux du Babinet
  - Celle-ci ajoute un déphasage  $\frac{2\pi}{\lambda_0} e\Delta n$  entre les deux « bras » (polarisations)
  - La déviation est donc

$$D = \frac{e\Delta n}{2\alpha\Delta n_B} \gamma$$

- On a donc pour finir

$$\frac{D}{i} = \frac{e\Delta n}{\lambda_0}$$

## 2 Activité optique

### 2.1 Pouvoir rotatoire intrinsèque

**Expérience**

Mise en évidence du pouvoir rotatoire ([1] p 316) :

- Montage polariseur/analyseur croisés, on ajoute des lames au milieu
- Montrer que la polarisation tourne, insister sur le fait que la lame est perpendiculaire
- Montrer que l'angle est proportionnel à  $e$
- Si on a le temps (on ne l'a pas), tracé de  $\alpha \left( \frac{1}{\lambda^2} \right)$

**Remarques**

Pour ne pas avoir de biréfringence et ne faire apparaître que le pouvoir rotatoire, on choisit des lames perpendiculaires.

**Transition :** De même qu'on peut avoir de la biréfringence induite, on peut induire un pouvoir rotatoire par application d'un champ magnétique.

**2.2 Pouvoir rotatoire provoqué****Expérience**

Effet Faraday ([1] p 321) :

- Utiliser les pièces tronconique trouées et le gros électroaimant
- Mesurer  $\|\vec{B}\|$  à *chaque fois* pour éviter les hystérésis
- Point en  $\theta = 0$  fait un peu n'importe quoi... Ne pas calibrer l'angle, mettre juste un offset dans l'ajustement.
- Pour le flint lourd, on s'attend à avoir une rotation d'angle  $\beta = \mathcal{V} \|\vec{B}\| e$  où  $\mathcal{V} = 0.1' \cdot \text{G}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} = 1.7 \times 10^3 \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ .

**Conclusion**

Ouverture sur la chimie et les mesures de précision (photoélasticimétrie, etc.). Parler de la microscopie polarisée (cf. SVT)

**Fil directeur** Comment produire et analyser des ondes EM polarisées

### Bibliographie

[1] SEXTANT. *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.

### Matériel

- Banc hyperfréquences + matériel pour étude de la polarisation + alimentation (pour la diode Gunn)
- Multimètres (\*2), Oscilloscope (\*2)
- Lampe Philora HP + filtre 546 nm
- Lame  $\lambda/2$  et  $\lambda/4$  pour 546 nm
- Condenseurs 8 cm, 12 cm et 15 cm
- Polariseurs (\*4)
- Diaphragme
- Lentilles : 10 cm (\*2)
- Miroir diélectrique (pour Brewster), avec le meilleur rapporteur possible dessus
- Miroir métallique (non sphérique!)
- Laser polarisé
- Polariseur tournant

## Introduction

La polarisation provient directement du caractère vectoriel du champ électromagnétique (et du spin 1 du photon). Il en existe différents types : au cours de ce montage nous allons commencer par mettre en évidence la polarisation la plus simple (rectiligne), puis nous nous intéresserons plus généralement à la production d'ondes polarisées et l'analyse d'une onde polarisée elliptiquement.

## 1 Caractère vectoriel des ondes électromagnétiques

### Expérience

Loi de Malus pour les ondes centimétriques

- Bien expliquer le sens dans lequel la grille coupe la polarisation
- Ajuster  $U^2$  (proportionnel à  $I$ ) en fonction de  $\theta$ .
- Maximiser le signal reçu mais ne pas trop rapprocher les cornets.
- Fixer la grille à un support tournant. La totalité du cornet doit être recouverte par la grille.
- Mesure à l'oscillo : moyenne pour avoir  $U$ , CC-EFF pour avoir  $u(U)$ .
- Ajustement par la formule

$$U^2 = A(\cos^2(\theta - \theta_0) + B),$$

avec offset d'angle et de tension mesurée.

**Transition :** On a à cette occasion vu un premier mode de production d'ondes polarisées rectilignement. En passant dans le domaine optique, on va voir bien d'autres méthodes, permettant d'obtenir d'autres types de polarisation.



## 2 Production d'ondes polarisées

- Polariseur, analyseur.
- Lames  $\lambda/2$  et  $\lambda/4$
- Monter lampe à vapeur de mercure + filtre interférentiel + diaphragme + lentille pour avoir un faisceau parallèle, montrer comment on analyse les polarisations.

### Expérience

Angle de Brewster ([1] p 270)

- Mesure semi-quantitative avec les miroirs sur support angulaire plus précis
- Donner la formule  $\tan i_B = n_2/n_1$ .
- Utiliser la lampe à vapeur de mercure de l'expérience précédente.
- Polariser le faisceau avant réflexion : ainsi on doit simplement observer une disparition du faisceau réfléchi.

## 3 Analyse d'ondes polarisées

### Expérience

Analyse d'une onde polarisée elliptiquement ([1] p 300)

- Utiliser une réflexion sur un miroir métallique ([1] page 299-300) pour la production : incidence oblique  $i \approx 75^\circ$ , polarisation rectiligne initiale  $\alpha \approx 70^\circ$  par rapport au plan d'incidence.
- Utiliser un laser.
- Analyse avec  $\lambda/4$  et analyseur :
  - Axes de l'ellipse
  - Taux d'ellipticité calculé par  $\tan \beta = \tan \left( \theta_{\min}^{\text{ellipse}} - \theta_{\text{extinction}}^{\text{après } \lambda/4} \right)$ .

Analyse avec polariseur tournant : on a  $\tan \beta = \sqrt{V_{\min}/V_{\max}}$ .

## Conclusion

Ouvrir sur les interférences en lumière polarisée (ex Fresnel-Arago) et les applications comme les lunettes 3D.

### Remarques

Il est important de connaître le principe des polariseurs utilisés...

**Fil directeur** Produire et mesurer des champs de divers ordres de grandeur

## Bibliographie

[1] Jean-Marie DONNINI et Lucien QUARANTA. *Dictionnaire de physique expérimentale*. T. 4. Pierron.

## Matériel

- Sonde à effet Hall + teslamètre
- Fluxmètre + filtre passe-bas associé + multimètre/oscilloscope
- Bobines Helmholtz
- Dispositif mesure du champ magnétique terrestre + Alim stabilisée 5 A + ampèremètre
- Électroaimant
- Petits aimants permanents + aimant en U

## Introduction

Champ magnétique : présent partout, que ce soit dans des applications médicales (imagerie), des moteurs (conversion électro-magnéto-mécanique de puissance) ou dans la Nature (champ de la Terre).

## 1 Mesure d'un champ magnétique

### Expérience

Présentation de la sonde à effet Hall et du fluxmètre

- Principe, avantage et inconvénients pour les 2 capteurs
- Application du fluxmètre : mesure du champ dans un aimant permanent ([1], section « Fluxmètre »).
- Mesurer le même champ avec la sonde à effet Hall

## 2 Utilisation de bobines

### 2.1 Champ créé par une bobine

#### Expérience

Champ créé par une bobine

- Montrer le dispositif
- Ajustement du champ sur l'axe
- Utiliser la sonde de Hall *longitudinale*
- Montrer qualitativement la configuration de Helmholtz?

### 2.2 Application : mesure du champ magnétique terrestre

### Expérience

Mesure du champ magnétique terrestre

- Dispositif avec boussole et spires, expliquer le principe de la mesure
- Bien l'éloigner des autres aimants pour éviter les champs parasites
- Prendre des points avec courant positif et négatif pour avoir une plus grande plage de valeurs.

## 3 Obtention de champs plus forts

### Expérience

Champ dans l'entrefer d'un électroaimant

- Sonde à effet Hall transverse, tenue par une potence
- Pièces tronconiques
- Vérifier l'homogénéité du champ (cela donne une incertitude sur la mesure)
- Mesurer l'épaisseur  $e$  au pied à coulisse.
- Ajustement en faisant varier  $e$  pour remonter à  $n$ ?

## Conclusion

Ouvrir sur la possibilité d'utiliser des champs magnétiques pour réaliser des moteurs.

**Fil directeur** Différents milieux magnétiques, points communs et différences, transitions entre eux.

### Bibliographie

- [1] Michel BERTIN, Jean-Pierre FAROUX et Jacques RENAULT. *Électromagnétisme 4*. Dunod, 1984.  
[2] Jean-Marie DONNINI et Lucien QUARANTA. *Dictionnaire de physique expérimentale*. T. 4. Pierron.

### Matériel

- Dispositif  $\text{FeCl}_3$  + électroaimant
- Teslamètre
- Lentilles (10 cm, 20 cm) + écran
- Transformateur démontable (bobines Leybold 250 spires, transformateur 220/220, rhéostat, boîte AOIP  $1 \times 10^5$ , condensateur
- Température de Curie du fer

## Introduction

Différents types de milieux magnétiques : diamagnétiques, paramagnétiques, ferromagnétiques, selon le signe et la valeur de la susceptibilité magnétique.

### Expérience

Mise en évidence des différents types de magnétisme

- Utiliser le gros électroaimant
- Suspendre les pièces à l'aide d'une potence
- Il faut produire des champs forts pour voir l'effet sur le barreau diamagnétique.

**Transition :** On va étudier un corps paramagnétique et un corps ferromagnétique et montrer que l'on peut avoir transition d'un état à l'autre lorsque l'agitation thermique devient suffisamment grande.

## 1 Milieux paramagnétiques

### Expérience

Mesure de la susceptibilité magnétique du chlorure de fer (III) en solution.

- Toujours avoir le ménisque au milieu de l'aimant
- Utiliser un gros électroaimant pour avoir des champs importants.
- Il n'est pas forcément nécessaire de projeter le ménisque sur un écran puisque on doit tout le temps bouger le pied.
- Prendre des points à champ positif et négatif pour faciliter l'ajustement et contraindre la parabole.
- Bien faire attention au lien entre la susceptibilité mesurée et la susceptibilité du chlorure de fer : voir [2] et [1].

**Remarques**

Le phénomène qui fait que le liquide se déplace avec les ions est la *pression osmotique*.

**Transition :** Autre type de magnétisme

**2 Milieu ferromagnétiques****Expérience**

Cycle d'hystérésis d'un milieu ferromagnétique

- Expliquer le montage et pourquoi on mesure  $\vec{B}$  et  $\vec{H}$
- Donner les facteurs de conversion
- Montrer le cycle, la saturation à haute puissance
- Il est difficile de comparer à des valeurs tabulées... On peut tout de même mesurer  $H_c$ ,  $B_r$ ,  $\mu_0 M_{\text{sat}}$ .
- Montrer qualitativement que les pertes fer, liées à l'aire du cycle, augmentent lorsque la tension d'entrée augmente.

**Expérience**

Mesure de la température de Curie

- Prendre le point en montée
- Ne pas hésiter à faire des incertitudes de type A afin d'avoir une valeur plus précise
- Attention, l'aimant se décroche un peu plus tôt à cause de son poids.

**Conclusion**

- Différents types de magnétisme mais le para et le ferro se rejoignent après la température de Curie.
- Ouvrir sur ferro durs et doux, intérêt de chaque type.
- Application au stockage dans les disques durs.

**Fil directeur** Individuellement les propriétés des métaux ne sont pas incroyables, mais ce qui fait qu'un métal est particulier est qu'il les possède toutes en même temps.

### Bibliographie

### Matériel

- Bain thermostaté + cuivre, barreau magnétique, agitateur magnétique chauffant
- Résistance à fil de platine (au cas où)
- Dispositif conductivité thermique du cuivre : alimentation stabilisée, deux thermocouples
- Multimètres (différentiels \*4)
- Oscilloscope
- Elastica + masses

## Introduction

Définition d'un métal avec les bandes de conduction. Montrer une plaque de métal : aspect brillant, toucher froid, solidité... propriétés que l'on va illustrer par la suite.

## 1 Propriétés de conductivité

### Expérience

Mesure de la conductivité thermique du cuivre

- Prendre quelques points en préparation
- ajouter un point au début de la manip, et modifier la puissance afin d'avoir un autre point à la fin
- En préparation, mesurer le temps nécessaire pour atteindre le régime permanent.
- En supposant toute la puissance transmise au barreau :

$$P = RI^2 = \lambda \frac{\Delta T \times S}{L}.$$

- On n'a pas la bonne valeur, mais c'est dans le bon sens : on imagine que ça conduit mieux qu'en réalité puisqu'il y a des pertes.

### Expérience

Mesure de la résistivité du cuivre

- Bien utiliser ampèremètre et voltmètre avec mesure quatre points et alimentation stabilisée en courant : l'ohmmètre n'est pas assez précis
- Expliquer l'intérêt de la mesure quatre points
- Ne pas hésiter à ajouter de l'eau froide si l'on veut baisser la température
- Incertitude obtenue en bougeant le thermocouple dans le bain. Homogénéiser en agitant avec un barreau d'agitateur (éteindre lors de la mesure?)
- Remonter à la constante de Wiedemann-Franz pour le cuivre. La loi de Wiedemann-Franz est une « preuve » de l'existence d'un gaz de Fermi d'électrons dans un métal!

**Remarques**

Principe de la mesure 4 points :

- On a des résistances de contact au niveau où on branche les appareils au circuit
- Si on met sur le même circuit l'ampèremètre et le voltmètre, le courant mesuré par l'ampèremètre va faire que les résistances de contact ajouteront une tension parasite mesurée par le voltmètre
- Solution : brancher voltmètre et ampèremètre sur deux circuits différents. Alors les résistances de contact de l'ampèremètre n'influent pas la mesure du courant et celles de contact du voltmètre ne sont traversées par aucun courant, donc elles ne modifient pas la tension.

**Transition :** Autre propriété des métaux : leur utilisation comme matériaux de construction, car ils sont solides.

## 2 Propriétés mécaniques

### Expérience

Mesure du module d'Young de l'acier

- Encadrer la masse critique à la main en ajoutant des masses
- Réaliser l'ajustement de la période en fonction de la masse. Laisser la longueur de la règle libre et interpréter le résultat.
- Bien vérifier l'horizontalité!
- Remonter au module d'Young : on devrait trouver typiquement entre 200 GPa et 220 GPa.

## Conclusion

Propriétés pas forcément impressionnantes seules : c'est leur réunion qui est étonnante et qui caractérise un métal. Le diamant conduit bien la chaleur mais pas le courant, les semiconducteurs conduisent bien le courant mais cela évolue beaucoup avec  $T$ , et il existe des polymères de haut module d'Young mais ils n'ont pas les mêmes propriétés de conduction...

**Fil directeur** Propriétés caractéristiques des semiconducteurs dues à leur structure électronique particulière.

### Bibliographie

[1] SEXTANT. *Optique expérimentale*. Hermann, 1997.

### Matériel

- Barreau de germanium non dopé avec alimentation stabilisée
- Ohmmètre, voltmètre, teslamètre
- Plaquette à effet Hall, alimentation 15 V
- Électroaimant
- Photorésistance polarisée, pyromètre optique avec hacheur, lame semi-réfléchissante du Michelson de poche, ensemble illuminateur-monochromateur + filtres interférentiels.
- Lentille de focale 10 cm
- GaP (au cas où une manip foire)

## Introduction

- Semiconducteurs : matériaux dont la conductivité varie de plusieurs ordres de grandeur sous l'effet de la température, de la présence d'impuretés, etc.
- Effet Hall : mettre en évidence deux types de porteurs
- Propriétés en fonction de la température : remonter à  $E_{\text{gap}}$ , grandeur caractéristique d'un semi-conducteur.

## 1 Propriétés de conduction

Les semiconducteurs ont des propriétés de conduction uniques, dues à leur faible « énergie de gap ».

### Expérience

Variation de la conductivité d'un semiconducteur avec la température

- Barreau de germanium non dopé, expliquer le setup avec résistance chauffante
- Prendre les mesures en refroidissement, à la main. On peut envisager une acquisition automatisée en préparation.
- Par ajustement, remonter à  $E_{\text{gap}}$
- Physiquement, l'évolution avec  $T$  est très spécifique aux semiconducteurs!

**Transition :** On peut **doper** les semiconducteurs pour augmenter le nombre de porteurs d'un certain type.



### Expérience

Mesure par effet Hall de la densité et du signe des porteurs dans un semiconducteur dopé

- Prendre plutôt du germanium dopé n pour éviter de devoir comprendre ce qu'est un trou.
- Pièces cylindriques dans l'électroaimant afin d'avoir le champ le plus uniforme possible.
- Effet Hall : particulièrement adapté pour les semiconducteurs
- Prendre du temps pour expliquer le sens du champ et le sens de la déviation
- Faire le schéma électrique au tableau, bien expliquer dans quel sens on mesure les grandeurs.
- Remonter à  $n$  et au signe des porteurs.
- Métaux : facteur  $10^{10}$  avec la tension de Hall d'un semiconducteur!

**Transition :** Présence du gap permet d'utiliser les semiconducteurs pour mesurer une intensité lumineuse : photons absorbés créent des paires électron-trou et modifient la conductivité.

## 2 Application à la photoconductivité

### Expérience

Réponse spectrale d'une photorésistance ([1] p 83, 58)

- Expliquer rapidement ce qu'on fait avec une photorésistance
- Lancer l'acquisition avec lame semi-réfléchissante + pyromètre + photorésistance + voltmètre + ohmmètre
- Expliquer au jury le fonctionnement complet pendant ce temps
- Commenter la réponse spectrale à l'aide des résultats sur le gap : maximum de réponse pour  $E_{\text{gap}}$ .
- Si ça foire, on peut étudier le gap de GaP.

## Conclusion

Ouvrir sur les applications des semiconducteurs : photorésistance dont on peut étudier la sensibilité, mais aussi transistors, diodes...

**Fil directeur** Étude des effets capacitifs dans plusieurs contextes

### Bibliographie

- [1] *Capteur capacitif - Mesure de niveau*. 197.
- [2] *Condensateur à lame d'air*. 168.
- [3] Jean-Marie DONNINI et Lucien QUARANTA. *Dictionnaire de physique expérimentale*. T. 4. Pierron.
- [4] Jean-Michel DUSSEAU. « Circuits électriques utilisant certains éléments constitués par des câbles coaxiaux ». In : *Bulletin de l'union des physiciens* 768 (1994).

### Matériel

- Condensateur d'Aepinus, LCR-mètre, plaques diélectriques
- Jauge à effet capacitif, eau distillée
- GBF, boîtier de résistances, oscillo
- Bobine Leybold, ordinateur avec GBF et logiciel d'interfaçage
- Boîte à décades de résistances.
- Câble coaxial 100 m

## Introduction

- Effet capacitif : accumulation de charges sur des conducteurs isolés en influence électrostatique
- La capacité dépend des caractéristiques du système, ce qui permet de remonter à des propriétés (exemple : écrans tactiles)
- Voir en quoi ces effets capacitifs permettent la propagation de signaux et en quoi ils jouent dans les limites des dipôles utilisés en TP.

## 1 Modèle du condensateur

### 1.1 Condensateur d'Aepinus

#### Expérience

Condensateur d'Aepinus ([2]) :

- Mesurer  $C$  pour différentes valeurs de  $e$
- Ajuster  $C = \varepsilon_0 \varepsilon_r S / e$  pour trouver  $\varepsilon_0$  (pour l'air,  $\varepsilon_r = 1$ ).
- Montrer le comportement qualitatif avec un diélectrique

#### Attention

On doit ajuster par  $1/C = a \times 1/d + b$  à cause des capacités parasites.

**Transition :** On peut utiliser ce genre de composant pour mesurer des distances entre deux « armatures »

## 1.2 Application : le condensateur comme outil de mesure

### Expérience

Jauge à effet capacitif [1] : étalonnage en préparation, mesurer une hauteur donnée.

- Faire un schéma clair qui explique le lien avec le condensateur plan
- Traiter correctement les incertitudes
- Bien penser à la borne GUARD
- Attention à la fréquence choisie : l'eau doit être conductrice.
- Prendre un point sur la droite d'étalonnage puis mesurer une hauteur inconnue. On ne peut pas redescendre (car l'eau a mouillé les parois), il faut donc aller en dehors de la plage d'étalonnage.

## 2 Propagation grâce aux effets capacitifs

On voit qu'un câble possède une capacité : cela explique l'utilisation de la borne GUARD pour les expériences du montage.

### Expérience

Mesure de la capacité d'un câble coaxial ([4]) à l'aide de la décharge d'un RC

- Problème : on mesure aussi les capacités parasites. Utiliser que des câbles coaxiaux et mesurer leur longueur?
- Qualitativement, mesurer le temps de montée avec des créneaux en entrée sur l'oscillo. Quantitativement, tracer un diagramme de Bode.
- Si on veut mesurer au LCRmètre, bien se rappeler de court-circuiter l'extrémité pour la mesure de  $L$  et de laisser ouvert pour la mesure de  $C$  (tout en se plaçant à basse fréquence).

**Transition :** Parfois des effets capacitifs surviennent seulement dans certaines plages de fréquence.

## 3 Effets capacitifs limitants

### Expérience

Comportement capacitif d'une bobine à haute fréquence ([3] p 56)

- Fréquence de résonance avec une modélisation RLC
- Réaliser un circuit LR, mettre une faible résistance pour que  $U_L$  ne change presque pas.
- Diagramme de Bode à l'ordinateur : mesure de  $E$  et de  $u_R = RI$ , ajustement de  $Z \propto \frac{E-u_R}{u_R}$  par

$$|Z| = A \times \frac{2\pi f}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + \frac{f^2}{f_0^2 Q^2}}}$$

- On mesure  $L$  au LCR-mètre à la fréquence maximale. Pour une bobine de 1000 spires, avec une inductance de 36 mH, on s'attend à trouver  $C \approx 70$  pF et  $f_0 \approx 100$  kHz.

## Conclusion

- On a vu plein d'effets capacitifs : comme composant, comme effet parasite, et des applications.
- On a aussi des effets inductifs!

**Attention**

C'est compliqué de mesurer correctement avec un LCR-mètre : ne pas hésiter à l'éteindre entre

chaque mesure / déconnecter et reconnecter les câbles.

**Fil directeur** caractéristiques de l'induction, notamment loi de modération.

### Bibliographie

- [1] André DEIBER et al. « Chute freinée d'un barreau aimanté en travaux pratiques ». In : *Bulletin de l'union des physiciens* 823 (2000).
- [2] André DEIBER et al. « Phénomène d'induction associé au mouvement d'un aimant dans un tube de cuivre ». In : *Bulletin de l'union des physiciens* 822 (2000).
- [3] Jean-Marie DONNINI et Lucien QUARANTA. *Dictionnaire de physique expérimentale*. T. 4. Pierron.

### Matériel

- Bobine Leybold, potentiomètre, boîtiers de résistances à décades, oscillo et GBF
- Configuration bobines de Helmholtz, condensateurs à décades, oscillo
- Matériel de courants de Foucault, petites masses, oscillo.

## Introduction

Définition de l'induction : apparition d'une fém lorsqu'on a un champ  $\vec{B}$  de flux variable. Champ variable, circuit fixe : induction de Neumann; champ stationnaire, circuit mobile : induction de Lorentz.

## 1 Auto-induction

### Expérience

Mise en évidence de la loi de Faraday ([3])

- On dérive un signal triangle, en se débarrassant de la résistance interne de la bobine.
- On met donc en évidence la loi caractéristique du dipôle "inductance", et on peut remonter à la valeur de  $L$ .
- Comparer à la valeur mesurée au LCR-mètre (prendre la même fréquence que le signal, environ 100 Hz).
- En cas de problème, ne pas hésiter à revenir au temps de montée d'un RL.

**Transition :** Création de  $\vec{B}$  variable a une rétroaction dans le circuit lui-même; mais le champ est créé dans tout l'espace et va donc agir sur les circuits électriques à proximité.

## 2 Inductance mutuelle

**Expérience**

Mesure d'un coefficient d'inductance mutuelle

- Circuits RLC couplés
- Utiliser les bobines de Helmholtz.
- Tracé du couplage  $\theta = M/\sqrt{L_1 L_2}$  en fonction de la distance entre les bobines, ajustement par

$$M = \frac{A}{(x - x_0)^n}$$

- On peut aussi suivre [3] p 107.

**Transition :** Courants induits peuvent créer un champ magnétique qui lui-même agit sur le circuit initial : c'est la loi de modération de Lenz.

**3 Freinage par courants de Foucault****Expérience**

Freinage par courants de Foucault

- Montrer qualitativement le phénomène, expliquer les signes
- Montrer qu'on est bien en régime permanent (amplitudes crête-à-crête identiques)
- Ajuster la vitesse finale en fonction de la masse ajoutée à l'aimant ([2, 1]). Objectif : valider un modèle de frottement fluide plutôt que trouver une valeur (donc bien insister sur le  $\chi^2$ !)

**Conclusion**

- Ouvrir sur le freinage dans les voitures, pour récupérer l'énergie
- Plaques à induction : maximiser les courants de Foucault (en fait c'est surtout chauffage par déplacement des parois de Weiss)

**Fil directeur** On est EDF, on veut produire une électricité propre et l'envoyer chez Jean-Michel pour qu'il puisse regarder la télé.

## Bibliographie

## Matériel

- Cellule photovoltaïque polycristalline, boîte de résistances à décades, ampèremètre, ohmmètre, thermopile de Moll, lampe QI + condensateur 15 cm
- Transfo 220 V/110 V, wattmètre, petit transfo 110 V/55 V, rhéostat, ampèremètre
- Plaque de redressement/filtrage, voltmètre, boîte AOIP. Si besoin, AO et alim pour montage suiveur.

## Introduction

- Modes de production d'énergie : nécessité de conversion, par exemple du 220 V aux tensions courantes.
- On se place dans la peau d'un fournisseur comme EDF, on veut produire de l'énergie électrique puis la convertir afin qu'elle soit utilisable.

## 1 Production d'énergie électrique

### Expérience

Cellule photovoltaïque polycristalline

- Bien utiliser la cellule *polycristalline*.
- Caractéristique (avec quelques points devant le jury) avec ajustement.
- Courbe  $\mathcal{P} = f(I)$ , trouver la puissance maximale.
- Calcul du rendement maximal en plaçant la pile de Moll à la place de la cellule.
- Utiliser voltmètre et ampèremètre.

## 2 Conversion alternatif/alternatif : le transformateur

### Expérience

Intérêt de transporter de l'électricité à haute tension (ne pas faire si pas de temps)

- Ne faire que si on a le temps
- Qualitatif, mais permet d'illustrer l'intérêt d'utiliser de hautes tensions puis de convertir.



**Expérience**

Bilan de puissance du transformateur

- Ne pas utiliser un transformateur démontable, car ceux-ci ont des pertes plus importantes.
- Détermination de la charge à utiliser, la puissance  $\mathcal{P}_1$ . Ne pas hésiter à changer de rhéostat pour avoir une plus grande plage de valeurs.
- Mesure des pertes fer en circuit ouvert, justifier que les pertes cuivre sont négligeables
- Mesure des pertes cuivre.
- Vérifier qu'on a bien  $\mathcal{P}_1 = \mathcal{P}_2 + \mathcal{P}_{\text{Fe}} + \mathcal{P}_{\text{Cu}}$ .

**Transition :** Comment obtenir une tension continue à partir de la tension sinusoïdale fournie par EDF?

**3 Transformation du signal pour le particulier : alternatif-continu****Expérience**

Plaquette de redressement-filtrage

- Tout brancher face au jury, en utilisant des câbles de différentes couleurs pour les différents étages.
- Pour la résistance de sortie, utiliser une boîte AOIP et faire un ajustement (à voir selon le temps disponible). On a

$$U = \frac{R}{R + R_s} e$$

- On peut aussi mesurer le taux d'ondulation à l'aide d'un voltmètre.
- Variation de la tension en sortie à cause de la décharge du condensateur dans la résistance d'entrée du multimètre : on pourrait s'en affranchir avec un AO (ou un transistor) en suiveur. En tous cas, il est préférable d'attendre environ une minute afin d'atteindre un « régime permanent ».

**Conclusion**

Ouvrir sur les onduleurs, les transfos? Parler du hacheur (conversion continu-continu).

**Fil directeur** Amplifier le signal d'un micro pour l'entendre par haut-parleur

### Bibliographie

- [1] Roger DUFFAIT et Jean-Pierre LIEVRE. *Expériences d'électronique*. Bréal, 1999.
- [2] Albert Paul MALVINO et David BATES. *Principes d'électronique*. Dunod, 2016.

### Matériel

- Transistor NPN, alimentation pour transistor, 3 résistances AOIP, 2 résistances variables, GBF, 3 condensateurs chimiques (deux de 10  $\mu$ F, un de 1000  $\mu$ F)
- 2 alimentations pour transistors, 2 transistors (un NPN et un PNP), un GBF, deux ampèremètres, un voltmètre, un oscillo et une résistance.

## Introduction

On veut générer un signal à partir d'un micro afin de l'envoyer sur un haut-parleur. Il faut donc l'amplifier en puissance, donc en tension et en courant.

## 1 Amplification en tension

### Expérience

Montage transistor à émetteur commun ([1] p 121, [2] p 280)

- Expliquer le fonctionnement, avec notamment le rôle des condensateurs (couper la composante continue) et le comportement du transistor (voir [2] page 277)
- Montrer la proportionnalité du gain avec  $R_c$
- Mesurer la résistance de sortie avec ajustement de  $U$  en fonction de  $I = U/R$
- Mesurer la résistance d'entrée avec la méthode de la tension moitié : mesurer la tension pour  $R$  infinie puis choisir  $R$  pour avoir la moitié de cette tension. Attention : on surestime  $R_e$  de 50 en entrée, à cause du GBF. Utiliser un voltmètre différentiel.
- Attention au sens des condensateurs (électrochimiques). En gros on met tous les + vers le transistor.
- Utiliser des alimentations stabilisées pour les 10 V.

## 2 Amplification en courant

### Expérience

#### Montage amplificateur push-pull

- Expliquer le fonctionnement : deux émetteurs suiveurs (voir [2] page 374)
- Montrer la distorsion de croisement
- Mesurer le rendement (deux ampèremètres sur les alimentations, en continu car c'est la valeur moyenne qui nous intéresse). Comparer à la valeur théorique.
- Mesurer les impédances d'entrée et de sortie par deux méthodes différentes : ajustement en mettant une résistance de charge, et résistance moitié.
- Mesure du taux de distorsion

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{+\infty} a_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{+\infty} a_n^2}}$$

avec  $a_n$  les amplitudes des pics de la FFT (faire attention à un potentiel facteur 2 dans les amplitudes données par l'oscilloscope!).

- On peut comparer le taux de distorsion total à des taux classiques pour des amplis : pour des signaux de commande d'appareils mécaniques, on peut avoir des THD jusqu'à 1 %, mais un ampli Hi-Fi est plutôt entre 0.001 % et 0.01 %... ce qui rend notre pauvre push-pull bien médiocre pour faire de la musique.

### Remarques

Si l'on souhaite montrer la chaîne complète avec émetteur commun + push-pull, il peut être nécessaire de placer un suiveur entre ces deux blocs (cf [2] page ??)

### Conclusion

- Une amplification nécessite des composants non linéaires, qui amènent dans le circuit des non-linéarités importantes qui peuvent être gênantes. On peut donc s'intéresser à la correction de ces problèmes.
- On peut parler des amplis à lampes (composants triodes, tétrodes, pentodes) qui étaient les premiers amplis : principe un peu comme celui du transistor, mais 40 ans plus tôt.

**Fil directeur** De la modulation à la démodulation : tout le trajet parcouru par le signal

**Bibliographie**

**Matériel**

- GBF pour le signal par lequel on module, un autre pour générer la porteuse
- Un GBF Keysight 33500B pour démoduler
- Trois oscilloscopes
- AO et multiplieur, alimentations, une résistance et un condensateur
- Câble coaxial de 100 m avec LCRmètre

## Introduction

On a un signal numérique : ce sont des créneaux entre  $-U$  et  $+U$ . Comment les transmettre? On étudie le protocole NRZ-FSK, utilisé dans les modems.

**Transition :** Tout d'abord, on doit envoyer ce signal sur une porteuse haute fréquence.

## 1 Modulation de fréquence

### Expérience

Modulation en fréquence d'un signal

- Montrer qualitativement comment tout est branché
- Vérifier le critère de Carson.
- Montrer qualitativement l'apparition et la disparition des harmoniques?
- Dans toute la suite, on utilise un « signal-type » pour moduler : une sinusoïdale.

**Transition :** Désormais, on peut transmettre ce signal sur une longue distance

## 2 Transmission du signal modulé

### Expérience

Étude du câble coaxial

- Mesurer la vitesse de propagation
- Comparer à la vitesse théorique obtenue avec les mesures de  $\Lambda$  et  $\Gamma$  au LCR-mètre.
- Mesurer l'atténuation.

**Transition :** Comment remonter au signal d'origine?

## 3 Démodulation : la PLL

### Expérience

Démoduler le signal

- Expliquer précisément le fonctionnement.
- Montrer comment fonctionne la PLL seule sans brancher le reste avant : plages de verrouillage et de capture. Montrer les courbes et faire l'ajustement en fonction des gains du système.
- Brancher le signal modulé : montrer que l'on récupère un créneau déformé à cause du RC.
- Évaluer le nombre maximal de bits par seconde que l'on peut transmettre avec cette méthode.

### Attention

Utiliser un AO en suiveur pour l'entrée VCF IN du GBF3 car celle-ci n'est pas à grande impédance.

### Conclusion

- Ouvrir sur les codages plus récents que NRZ : on peut par exemple ne coder que les inversions
- Parler de multiplexage, et de modulation en quadrature (on module un cos et un sin sur le même signal)

**Fil directeur** On a un signal bruité : comment réduire le bruit pour acquérir numériquement? Peut-on tirer profit du bruit?

### Bibliographie

- [1] *Bruit thermique d'une résistance*. 580.  
 [2] Jérémy NEVEU. *Cours d'électronique de la préparation à l'Agrégation de Physique*. 2018.

### Matériel

- GBF, multiplieur, 2 résistances pour le diviseur de tension, générateur de bruit, ampli de puissance, oscillo
- Oscilloscope et logiciel d'interfaçage
- Boîtier de mesure du bruit d'une résistance, ampli spécifique, multimètre et oscilloscope.

### Remarques

Tout au long du montage il peut être intéressant de calculer les rapports signal sur bruit.

## Introduction

Définition du bruit : partie non désirable d'un signal. Il est présent dans tous les types de signaux : il est dû à tous les phénomènes que l'on ne maîtrise pas. On veut s'en débarrasser, mais pour cela il faut savoir au préalable la forme du signal que l'on veut distinguer de ce bruit.

## 1 Origines du bruit

### Expérience

Bruit d'échantillonnage.

- L'échantillonnage d'un signal associe à une valeur « vraie » une valeur codée sur le bit le plus proche (en gros, ça dépend des systèmes).
- Rampe avec GBF sur oscilloscope, utiliser différents calibres de l'oscilloscope.
- Acquérir via interface et Single, retrouver le signal « théorique » via un ajustement, calculer les différences.
- Ajustement en fonction du pas de quantification : on s'attend à avoir :

$$\langle s^2 \rangle \propto \delta^2$$

où  $\delta$  est le pas de quantification (voir [2] p 123).

### Remarques

Bruit de quantification : très désagréable à écouter, on rajoute parfois du bruit aléatoire qui le noie. Voir la technique de « Dither ».

**Transition :** On a vu une source de bruit. De façon générale, on a beaucoup de sources de bruit, et on peut chercher à s'en débarrasser.

## 2 Diminution du bruit

### Expérience

Détection synchrone sur un signal bruité

- Générer un signal, le rendre de faible amplitude avec un diviseur de tension
- Ajouter du bruit, amplifier le tout
- Utiliser le signal d'origine dans une boucle de détection synchrone : on pourrait aussi retrouver le signal à l'aide d'une PLL.
- Faire une droite d'étalonnage de l'amplitude du signal en sortie en fonction de celui en entrée : pour  $V_e \cos \omega t$  en entrée, on a  $V_s = A \times V_e + B$ .
- Montrer le signal en entrée, montrer qu'il est très bruité et que le dispositif retrouve bien la bonne amplitude.
- Pour être quantitatif, calculer le rapport signal sur bruit en entrée.

**Transition :** Peut-on aussi utiliser le bruit d'un système pour remonter à des propriétés?

## 3 Utilisation du bruit

### Expérience

Détermination de  $k_B$  à partir du bruit thermique d'une résistance ([1])

- Vase Dewar d'azote liquide, glace fondante, température ambiante, eau chaude et eau bouillante.
- Connecter les différents éléments directement sans câbles coaxiaux pour éviter de diminuer la bande passante. Ce n'est pas nécessaire lorsqu'on va sur l'oscillo.
- Ne pas utiliser des câbles banane, ça fait n'importe quoi!
- Vérifier la faible variation de  $R$  avec  $T$  en mesurant  $R$  à chaque fois.

### Remarques

Concernant les étages d'amplification, il s'agit d'avoir un bruit *en entrée* (pour pouvoir le comparer au bruit thermique) le plus faible possible. Il est préférable d'utiliser plusieurs amplificateurs plutôt qu'un seul, pour plusieurs raisons :

- On ne veut pas trop amplifier le bruit électronique. En utilisant trois amplis, le premier doit être particulièrement peu bruyant, et le bruit généré par les suivants pourra potentiellement compenser celui généré par le premier.
- Par conservation du produit gain-bande passante, si on avait un seul AO on aurait une bande passante très faible!

Il n'y a aucune différence entre le montage inverseur et non inverseur en terme de valeur efficace de bruit, comme montré dans <http://public.iutenligne.net/electronique/couturier/bruit-en-elect/6/index.html>.

## Conclusion

Ouvrir sur les traitements réalisés dans LIGO et Virgo pour s'affranchir du bruit et retrouver un signal tout en écartant les possibilités de fausse corrélation.

# Mesure des fréquences temporelles (domaine de l'optique exclu)

**Fil directeur** Différentes manières de mesurer des fréquences.

## Bibliographie

- [1] Jean-Marie DONNINI et Lucien QUARANTA. *Dictionnaire de physique expérimentale*. T. 4. Pierron.  
 [2] *Fréquencemètre numérique*. 448.

## Matériel

- Plaquette de modélisation du principe de fréquencemètre, alimentation 8V
- Grand nombre de GBF : 3 Metrix, 1 Keysight très récent
- Oscillateur à quartz (assez récent si possible)
- Multiplieur avec alimentation, oscilloscope
- Deux résistances et deux capacités, un GBF et un multimètre
- Thermocouple (pour la vitesse du son)
- Dispositif pour l'effet Doppler, règle en métal.

## Introduction

Définition de la seconde : donne la base de temps fixe, et on ne peut ensuite que comparer par rapport à cette base de temps.

## 1 Mesures par comptage et acquisition numérique

### Expérience

Principe du fréquencemètre numérique ([2])

- On peut utiliser le monostable inséré (porte de 1 s).
- Montrer que si  $f > 100\text{ Hz}$ , problème. Deux interprétations : repliement de spectre, ou simplement pas assez de bits...
- On peut aussi utiliser sa propre porte pour étudier la précision.
- Comparer avec une FFT à l'oscillo?

**Transition :** On sait mesurer des fréquences assez faibles. Peut-on utiliser cette possibilité pour accorder des générateurs de fréquence plus élevée?

## 2 Mesures par comparaison

### Expérience

Détection synchrone pour étalonner des GBF

- Prendre deux GBF de marque identique (Metrix par exemple), un passe-bas de faible fréquence de coupure : la fréquence du signal en sortie peut être obtenue au fréquencemètre, mesurée à l'oscillo...
- Comparer aussi un Metrix avec un Keysight récent bien plus efficace.
- On ne peut pas trop utiliser les oscillateurs à quartz car ceux-ci, un peu vieux, se décalent en fréquence et sont moins précis que les GBF!



### Expérience

Détection synchrone : effet Doppler acoustique

- Utiliser le même dispositif de détection synchrone pour les deux expériences.
- Scotcher une règle en métal.
- Insister sur la mesure de *fréquence* et non pas la mesure de vitesse.
- Bien mesurer la température pour déterminer  $c_{\text{son}}$  !

**Transition :** On peut enfin réaliser une mesure de fréquence en accordant un dispositif de fréquence contrôlable et un signal extérieur.

## 3 Mesure par accord

### Expérience

Pont de Wien-Robinson ([1] section « Ponts de mesure en alternatif »)

- Expliquer pourquoi lorsque le pont est ajusté on a accès à la fréquence.
- Utiliser la formule pour  $C_1$  et  $C_2$  différents :  $C_1 C_2 R_1 R_2 \omega^2 = 1$ .
- On ne peut pas rendre nulle la tension dans le pont, mais on peut la minimiser.
- Prendre des valeurs pour plusieurs  $C$ , afin de faire un ajustement.

## Conclusion

Ouvrir sur les dispositifs les plus précis : les horloges atomiques.

**Fil directeur** Mesures de longueurs sur des échelles très variées.

### Bibliographie

### Matériel

- Boîtier de mesure de longueur, lentille de courte focale (20 cm par exemple), miroir triple et oscillo
- Banc optique, photodiode polarisée en inverse et lampe quartz-iode
- Laser et élargisseur, fente étalonnée, caméra CCD

### Remarques

Tout au long de ce montage, il est important d'insister sur les incertitudes : on fait de la métrologie, il faut être précis. Bien comparer chaque mesure à ce que nous donnerait un mètre-ruban ou un pied à coulisse par exemple.

## Introduction

Définition du mètre, importance de la mesure de longueur à toutes les échelles : étude de l'infiniment grand, production de pièces de précision à notre échelle...

**Transition :** Il est naturel de commencer par proposer une mesure de distance basée sur la mesure du temps de propagation de la lumière.

## 1 Mesure à partir de la définition du mètre

### Expérience

Mesure de longueur par télémétrie

- On utilise ce dispositif en tant que mesureur de longueur en supposant connue  $c$  (c'est tout à fait justifié puisque  $c$  est fixée par le système international).
- Bien expliquer pourquoi on doit faire deux mesures avec le miroir secondaire : les pics se chevauchent lorsqu'on est à trop faible distance. On doit donc bien déclencher sur le signal externe!
- Montrer qu'on est essentiellement limité par la précision de la mesure temporelle.

## 2 Mesure à l'échelle de l'infiniment grand

**Expérience**

Méthode de la chandelle standard

- Parler des chandelles standard en astrophysique (supernovas de type 1a) : sources dont on connaît la luminosité, que l'on utilise pour mesurer des distances spatiales. Ici, c'est la même idée, sauf qu'on procède à un étalonnage puisqu'on ne connaît pas exactement le profil d'émission de la source.
- Courbe d'étalonnage : tracer  $V = \frac{V_0}{(d-d_0)^2}$ .
- Ajouter un point sur la courbe d'étalonnage, ajuster et montrer que l'on peut retrouver une distance quelconque - avec incertitude.

**3 Mesure à échelle microscopique****Expérience**

Diffraction par une fente étalonnée

- Utiliser une fente étalonnée précisément.
- Montrer le phénomène de diffraction
- Acquisition à la CCD, ajustement du sinus cardinal sur un des côtés de la figure de diffraction : on remonte à la largeur de la fente.
- Pour les incertitudes : en  $x$ , se joue au niveau du pixel.
- Insister sur le fait que la précision augmente lorsque la taille de la fente diminue.
- Si on a encore du temps, on peut faire pareil avec par exemple des motifs répartis aléatoirement...

**Conclusion**

Techniques très différentes en fonction de l'échelle que l'on considère. Microscopie, limites de résolution à cause de la diffraction, etc. Techniques quantiques pour encore plus de précision.

**Fil directeur** Propriétés et utilisation de systèmes bouclés.

### Bibliographie

[1] Michel KROB. *Électronique expérimentale*. ellipses, 2002.

### Matériel

- AO (en prendre plusieurs de chaque modèle en cas de problème), alimentation 12 V et 15 V.
- 3 boîtes AOIP 1 k, une résistance variable, 2 condensateurs, un interrupteur
- Un ou deux GBF
- Un oscillateur à quartz
- Deux GBF Keysight 33500B, un AO, un multiplieur, deux alims, une résistance et un condensateur.
- Boîtier d'asservissement du moteur, alimentation.

## Introduction

Systèmes bouclés : chaîne directe et boucle de rétroaction. La sortie "réroagit" sur l'entrée, avec différents cas :

- soit il n'y a pas d'entrée extérieure, et le système auto-amplifie certains signaux bien choisis par la boucle de rétroaction ;
- soit il y a une grandeur de consigne en entrée, et la rétroaction permet d'assurer le suivi de cette consigne en adaptant le signal fourni à la chaîne directe.

### Remarques

Pour chaque expérience, représenter le schéma-bloc au tableau.

## 1 Systèmes bouclés instables : les oscillateurs

### Expérience

Oscillateur à pont de Wien

- Étude en boucle ouverte ([1] p 134) : pulsation de résonance,  $R_2$  pour avoir un gain de 1, diagramme de Bode
- Démarrage des oscillations :
  - Boucler le système
  - Vérifier le critère de Barkhausen pour  $R_2$
  - Oscillations quasi-sinusoïdales, le voir avec une FFT
  - Ajustement du démarrage par

$$s(t) = s_0 \exp(-\alpha \omega_0 t) \sin\left(\sqrt{1 - \alpha^2} \omega_0 t + \varphi\right)$$

où  $\alpha = 1 - \frac{R_2}{2R_1}$  et  $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ .

- Régime permanent : amplitude contrôlée par  $V_{\text{sat}}$  (le voir en modifiant l'alimentation)
- Passage en oscillateur à relaxation en augmentant  $R_2$ . Faire la FFT.

**Remarques**

Il peut être plus adapté d'observer à l'oscilloscope la sortie du passe-bande plutôt que son entrée : le signal est censé être plus « pur » harmoniquement, et est directement  $V_{\text{stat}}/(1 + R_2/R_1)$ .

**Transition :** Comment faire mieux en terme de précision? Le composant qui contrôle celle-ci est le passe-bande, on va donc en choisir un de meilleur facteur de qualité.

**Expérience**

Oscillateur à quartz

- Oscillateur de bien meilleur facteur de qualité : il est attendu par le jury...
- Montrer que la fréquence est bien plus stable lorsqu'on s'éloigne du seuil.

**Transition :** Et pour les systèmes bouclés stables?

**2 Systèmes bouclés asservis****Expérience**

Boucle à verrouillage de phase ou PLL

- Expliquer *précisément et pédagogiquement* son fonctionnement, en particulier le caractère « système bouclé ».
- Montrer les plages de verrouillage et de capture
- Noter en jouant sur la fréquence du GBF 3 que celles-ci sont différentes (verrouillage plus grande que capture).
- Tracer  $\Delta f_v$  en fonction de  $k_0$ , gain du GBF3. Ceci appuie particulièrement sur la notion de système bouclé, car on joue sur un gain.

**Attention**

- Il est vraiment important d'avoir un GBF Keysight ultramoderne pour GBF3. On peut utiliser n'importe quel GBF pour GBF2, mais il faut que sa fréquence soit facile à changer (puisque c'est sur celle-ci que l'on va jouer pour mesurer les plages).
- Utiliser un AO en suiveur pour l'entrée VCF IN du GBF3 car celle-ci n'est pas à grande impédance.

**Expérience**

Asservissement d'un moteur

- Détailler les différents blocs.
- Attention à bien brancher toutes les masses.
- Montrer que le moteur seul ne suit pas en cas de frottements.
- Asservissement avec un GBF externe, montrer à quel point le moteur peut suivre les créneaux
- Correction intégrale : dépassement, mais meilleur suivi.

**Conclusion**

- Rétroaction : assure le suivi d'une consigne.
- Si on boucle de manière instable, on obtient des oscillations qui sont aussi très utiles, notamment dans les lasers!

**Fil directeur** Propriétés fondamentales des instabilités et des phénomènes non linéaires : bifurcations, ajout de fréquences...

### Bibliographie

### Matériel

- Pendule simple, ordinateur avec LatisPro
- Elastica avec masses, balance, règle
- AO, 3 résistances AOIP, une résistance variable, deux condensateurs, un oscillo, deux alims (15 V et 12 V), un interrupteur.

## Introduction

Aspects caractéristiques des systèmes non linéaires :

- Ajout de fréquences
- Différentes positions d'équilibre, stables ou instables
- Ralentissement critique
- Saturation

## 1 Réponse d'un système non-linéaire

### Expérience

Pendule simple (ou pesant)

- Portrait de phase. À grande amplitude, la période varie.
- Formule de Borda (avec Latis Pro). Ajuster en laissant un terme d'ordre 4 :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \left( 1 + \frac{1}{16}\theta_0^2 + \frac{11}{3072}\theta_0^4 + \mathcal{O}(\theta_0^6) \right)$$

- FFT : apparition d'harmoniques supplémentaires?
- Une fois le pendule équilibré, on a tout de même une légère erreur due au fait que  $T_0 = 2\pi\sqrt{l/mg}$ . Cependant, si la masse au bout de la tige est suffisamment grande par rapport à la masse de la tige, on peut négliger cette erreur.

### Attention

Le portrait de phase est difficile à tracer à cause de l'impossibilité de réaliser une dérivée numérique correcte. Plusieurs choix sont possibles :

- Ne pas le faire du tout.
- Ne le faire que sur une période avec suffisamment peu de points.
- Le faire avec  $\theta$  et  $\int \theta(t) dt$ , mais la moindre erreur sur le zéro se retrouve intégrée...
- Intégrer  $\theta(t)$  puis dériver deux fois et lisser.

**Transition :** Dans ce système non-linéaire, il existe différentes positions d'équilibre, stables et instables (ce qui ne peut pas être le cas pour un système linéaire simple). Selon un paramètre extérieur, l'existence, le nombre et la stabilité de telles solutions d'équilibre peut varier : étudions-le sur l'exemple suivant.

## 2 Bifurcation et ralentissement critique

### Expérience

Elastica : bifurcation fourche

- Trouver la masse critique « à la main »
- Ajustement par la formule

$$T = T_0 \sqrt{\frac{\tan\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{m_c}}\right)}{\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{m_c}}} - 1}$$

afin de retrouver  $m_c$ .

- Commenter sur la forme fourche de la bifurcation.

**Transition :** Position  $\theta = 0$  passe de stable à instable lorsqu'un paramètre, ici la masse, varie. On peut utiliser ce phénomène pour créer des oscillations spontanées.

## 3 Naissance d'oscillations par instabilité et saturation

### Expérience

Oscillateur à pont de Wien

- Démarrage des oscillations :
  - Vérifier le critère de Barkhausen pour  $R_2$
  - Oscillations quasi-sinusoïdales, le voir avec une FFT
  - Ajustement du démarrage par

$$s(t) = s_0 \exp(-\alpha \omega_0 t) \sin\left(\sqrt{1 - \alpha^2} \omega_0 t + \varphi\right)$$

où  $\alpha = 1 - \frac{R_2}{2R_1}$  et  $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ .

- Régime permanent : amplitude contrôlée par  $V_{\text{sat}}$  (le voir en modifiant l'alimentation)
- Passage en oscillateur à relaxation en augmentant  $R_2$ .
- Ici encore, il peut être préférable d'observer le signal en sortie du passe-bande.

## Conclusion

- Non linéarités : comportements qualitativement différents, apparition d'harmoniques, saturations...
- Ouvrir sur les exposants de Lyapunov?

### Remarques

On peut faire une analogie assez intéressante entre le mouvement d'un pendule simple (passage de solutions oscillantes à des solutions tournantes) et une transition de phase du deuxième ordre (ferromagnétique/paramagnétique).

En effet, on a :

$$\dot{x}\ddot{x} + \dot{x}\omega_0^2 \sin x = 0 \quad \text{soit} \quad \frac{\dot{x}^2}{2} + \underbrace{\omega_0^2(1 - \cos x)}_{V(x)} = C$$

Par séparation des variables, on en déduit l'expression de la période

$$\int_0^{x_{\max}} \frac{dx}{\sqrt{2(C-V(x))}} = \frac{T}{4}$$

Pour l'énergie potentielle :

— Dans le cas harmonique (petites oscillations), on a

$$-\omega_0^2 \langle x^2 \rangle = \langle x\ddot{x} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T x\ddot{x} dt = \left[ \frac{1}{T} x\dot{x} \right]_0^T - \frac{1}{T} \int_0^T \dot{x}^2 dt = -\langle \dot{x}^2 \rangle,$$

le crochet s'annulant par périodicité. Ainsi  $\frac{1}{2} \langle \dot{x}^2 \rangle = \frac{1}{2} \omega_0^2 \langle x^2 \rangle$ . Il y a équipartition, et l'énergie totale valant  $C$  on a pour  $x \ll 1$ ,

$$\langle V(x) \rangle \simeq \frac{C}{2}.$$

— Pour  $C \rightarrow 2\omega_0^2$ , le système passe l'essentiel de son temps autour de  $\pm\pi$  donc  $\langle V(x) \rangle \simeq 2\omega_0^2$ .

— Enfin pour  $C \rightarrow \infty$  le pendule tourne très vite, donc  $\langle \cos x \rangle \simeq 0$  et  $\langle V(x) \rangle \simeq \omega_0^2$ .

En traçant  $\langle V(x) \rangle$  et  $T$  en fonction de  $C$ , on a les analogies suivantes :

**aimantation**  $M \iff$  **vitesse moyenne**  $\langle \dot{x} \rangle$  0 dans une phase (solutions oscillantes / phase paramagnétique),  $\neq 0$  dans l'autre (solutions tournantes / phase ferromagnétique) ;

**capacité calorifique**  $C_V \iff$  **énergie potentielle moyenne**  $\langle V(x) \rangle$  maximum à la traversée de la séparatrice / de la température critique mais continue ;

**susceptibilité magnétique**  $\chi \iff$  **période**  $T$  qui diverge à la traversée de la séparatrice / de la température critique.



**Fil directeur** Deux façons de voir la propagation des ondes : libres, ou stationnaires.

**Bibliographie**

**Matériel**

- Cuve à ondes, oscilloscope, règle et scotch
- Câble coaxial de 100 m, petit potentiomètre à mettre au bout, LCRmètre
- GBF Keysight 33500B, oscilloscope
- GBF, émetteur/récepteur à ultrasons, oscilloscope, tuyaux en plastique.

## Introduction

Définition d'une onde progressive : propagation d'une perturbation, sans transport de matière mais avec transport d'énergie. De nombreux types d'ondes, mais qui vérifient toutes la même équation de propagation : on s'attend à des comportements similaires dans de nombreux domaines de la physique.

## 1 Propagation libre

### Expérience

Relation de dispersion des ondes de surface

- Bien nettoyer la cuve à l'éthanol. Ne pas le faire trop tôt durant la préparation car l'eau se salit ensuite!
- Mettre suffisamment d'eau permutée pour assurer  $\tanh kh = 1$ .
- Mesurer le grandissement *et ne pas l'oublier dans le calcul ensuite!* On s'attend à 1.67 environ.
- Scotcher une règle pour s'assurer de l'horizontalité. Mesurer quelques longueurs d'onde au pied à coulisse.
- Le stroboscope répond lentement, ne pas être trop pressé sinon on n'atteindra jamais la bonne fréquence.
- Ajustement de la relation de dispersion pour déterminer  $\gamma$  (prendre un ou deux points face au jury).

**Transition :** La propagation est en fait rendue possible par l'évolution conjointe de deux grandeurs couplées : le lien entre ces deux champs est caractéristique du milieu et s'appelle l'impédance.

## 2 Impédance et réflexion

**Expérience**

Ondes dans un câble coaxial

- Utiliser un GBF ultramoderne pour envoyer les pulses.
- Mesure de l'impédance caractéristique, en annulant l'onde réfléchie ou en ajustant par

$$U_r = U_0 \frac{R - Z_c}{R + Z_c},$$

puis comparaison à la valeur théorique avec  $\Lambda$  et  $\Gamma$  (mesurés au LCR-mètre).

- Mesure de la vitesse de l'onde
- Comparer cette vitesse à l'expression théorique  $1/\sqrt{\Lambda\Gamma}$ .

**Attention**

Lors de la mesure de  $\Lambda$  et  $\Gamma$  au LCR-mètre, il faut bien penser à court-circuiter le bout du câble pour mesurer  $\Lambda$  et à le laisser ouvert pour mesurer  $\Gamma$ . En effet l'analogie électromécanique relie  $C$  à  $1/k$ ,  $L$  à  $m$  et  $i$  à  $v$ , donc lorsque  $i$  est nul en bout de câble celui-ci est équivalent à une chaîne de ressorts et de masses fixée à un mur : à basse fréquence, il est équivalent à un seul ressort.

**Transition :** La propagation d'ondes dans le câble coaxial est en réalité de la propagation guidée d'ondes électromagnétiques.

**3 Propagation guidée****Expérience**

Propagation guidée des ondes acoustiques dans un tuyau

- Utiliser un GBF ultramoderne pour envoyer les pulses.
- Mesurer le temps de vol et bien le retrancher de toutes les mesures.
- Pour un premier diamètre, mesurer les vitesses de groupe des modes passants et comparer à la théorie.
- Montrer que si le diamètre change on change le nombre de modes.
- Ici la dispersion est due au guidage : l'air n'est pas dispersif.

**Conclusion**

Ouvrir sur d'autres phénomènes ondulatoires : ondes stationnaires, interférences et diffraction.

**Fil directeur** Propriétés des ondes acoustiques.

### Bibliographie

[1] Jean ADLOFF et Olivier KEMPF. « Résonance aiguë et auto-oscillation dun diapason ». In : *Bulletin de l'union des physiciens* 801 (1998).

### Matériel

- Émetteur et récepteur à ultrasons, guide d'ondes acoustique, oscilloscope et règle
- Banc pour l'effet Doppler, GBF, multiplieur, résistance, condensateur, oscilloscope et chronomètre
- Diapasons, bobine Leybold avec noyau en fer doux, GBF, microphone (avec potence et pince) et multimètre.

## Introduction

Ondes acoustiques : propagation couplée de la surpression et de la vitesse. On s'intéresse à la production, puis on étudiera quelques caractéristiques des ondes elles-mêmes.

## 1 Production d'ondes acoustiques

### Expérience

Étude de la résonance d'un diapason

- Bien accrocher le micro dans la caisse de résonance
- Prendre quelques points du diagramme de Bode, ne pas oublier de normaliser par la valeur maximale
- Ajustement par un passe-bande : on remonte au facteur de qualité  $Q$  et à la fréquence de résonance  $f_0$ . Même si  $f_0$  n'est pas exactement 440 Hz, on en sera très proche : ne pas oublier qu'un demi-ton correspond à un décalage relatif de  $2^{1/12}$
- Expérience assez délicate à reproduire : ne surtout pas toucher une fois que les points en préparation sont obtenus. Bien scotcher tout le matériel.
- Il peut être intéressant de montrer qualitativement l'influence des frottements sur le facteur de qualité en faisant tremper le diapason dans de l'eau (mais ça risque de nuire à la reproductibilité!).
- S'il reste encore du temps, on peut utiliser un second diapason déréglé et mettre en évidence les battements, puis remonter au décalage en fréquence.
- Bien lire le BUP [1] pour répondre aux questions.

## 2 Propagation libre

### Expérience

Mesure de la vitesse du son dans l'air

- Utiliser un banc optique, soyons précis!
- Ne pas oublier de relever la température.
- Deux modes de mesure possibles : croisements des sinusoïdales ou mode XY.

### Expérience

Effet Doppler acoustique

- Scotcher une règle pour bien mesurer les distances.
- Là encore, relever la température.
- Il s'agit du mode de fonctionnement des radars.

**Transition :** Influence des conditions aux limites.

## 3 Propagation guidée

### Expérience

Propagation guidée des ondes acoustiques dans un tuyau

- Utiliser un GBF ultramoderne pour envoyer les pulses.
- Mesurer le temps de vol et bien le retrancher de toutes les mesures.
- Pour un premier diamètre, mesurer les vitesses de groupe des modes passants et comparer à la théorie.
- Montrer que si le diamètre change on change le nombre de modes.
- Ici la dispersion est due au guidage : l'air n'est pas dispersif.

## Conclusion

Ouvrir sur les instruments de musique : importance du choix du matériau, de l'adaptation d'impédance...

**Fil directeur** Résonances dans différents domaines, avec stricte équivalence (même interprétation de  $Q$ , etc.)

### Bibliographie

- [1] Jean ADLOFF et Olivier KEMPF. « Résonance aiguë et auto-oscillation dun diapason ». In : *Bulletin de l'union des physiciens* 801 (1998).
- [2] JM BERTHELOT. « Étude de circuits couplés ». In : *Bulletin de l'union des physiciens* 562 (1974).
- [3] Jean-Marie DONNINI et Lucien QUARANTA. *Dictionnaire de physique expérimentale*. T. 4. Pierron.

### Matériel

- GBF, ampli de puissance, 2 résistances variables, une bobine Leybold et un condensateur
- Un LCRmètre, un multimètre
- Un ordinateur avec oscilloscope interfacé
- Diapasons, bobine Leybold avec noyau en fer doux, GBF, microphone (avec potence et pince) et multimètre.
- Petite cuve et eau distillée
- 2 bobines Leybold, 2 condensateurs, un GBF et un oscilloscope.

## Introduction

- Définition rapide : maximum de l'amplitude de la réponse à une excitation en fonction d'un paramètre (ici : la fréquence).
- Avoir à l'esprit que la résonance correspond aussi à une maximisation des transferts énergétiques.
- Dans ce montage, le but est de mettre en avant le lien entre le facteur de qualité, la réponse temporelle et la réponse fréquentielle.

## 1 Circuit RLC (série)

### 1.1 Résonance en intensité

- Mesure de la tension aux bornes de  $R'$ .
- Obtenir  $\omega_0$  en mode XY
- Comparaison aux valeurs théoriques
- Faire varier  $Q$  et montrer que la résonance existe quel que soit  $Q$ .

### Remarques

- Pour montrer qualitativement ce qui se passe, utiliser une wobblation?
- Avoir mesuré en préparation les composants qu'on utilise au LCR-mètre.
- Se débrouiller pour que le passage de  $Q > \frac{1}{\sqrt{2}}$  à  $Q < \frac{1}{\sqrt{2}}$  soit facile : typiquement prendre  $Q \approx 3$  (utile pour la suite)
- Pour se débarrasser de l'impédance de sortie du générateur, utiliser un ampli de puissance.

**Attention**

On a des erreurs dues aux résistances d'entrée et de sortie du générateur et de l'oscilloscope. Une solution est d'utiliser un montage suiveur ([3] section « Régime sinusoïdal forcé »). On peut aussi mesurer  $I$  et  $U$  en même temps à l'aide d'un montage convertisseur courant-tension, mais en pratique c'est compliqué, donc il faut surtout avoir conscience du problème.

**1.2 Résonance en tension**

- Inverser  $R'$  et  $C$ .
- Tracer un diagramme de Bode rapide à l'ordi : commenter module et phase
- Tracer un diagramme de Bode pour  $Q \simeq \frac{1}{\sqrt{2}}$  : résonance bien décalée et plus grande bande passante
- Tracer un diagramme de Bode pour  $Q < \frac{1}{\sqrt{2}}$  : plus de résonance
- Quantitativement, tracer un beau Bode avec plein de points et ajuster  $\omega_0$  et  $Q$ .

**Remarques**

- On doit échanger la résistance et le condensateur : se débrouiller pour que ce soit le plus « flawless » possible.

**Transition :** Passer en mode créneaux, montrer que  $Q$  correspond aussi à la durée du régime libre. Frapper le diapason : régime libre plus grande, ça donne l'idée de l'exciter périodiquement pour étudier sa résonance.

**2 Diapason [1]**

Il y a absolument tout ce qu'il faut savoir dans [1].

**2.1 Facteur de qualité**

- Présentation du montage
- Faire un enregistrement du régime libre avec le mode Single de l'oscillo (idéalement en conclure que  $Q$  est 1000 fois plus grand que pour le RLC)
- Montrer qu'on a pas de résonance à  $f_0 = 440$  Hz mais à  $f_0/2$ .
- Prendre un point face au jury, en attendant bien la fin du régime transitoire! Ce point peut vraiment foirer, mais en cas de problème on peut normaliser par la valeur maximale à la résonance.
- Système compliqué, mais on modélise juste la résonance en position (le micro étant sensible à la position).
- Faire un fit à l'ordi, trouver  $f_0$  et  $Q$ .
- Relier ce  $Q$  élevé à l'étroitesse de la bande passante

**Attention**

- Il y a aussi une résonance à 440 Hz, qui provient d'effets non linéaires...
- En pratique, la précision de la fréquence fournie par le générateur est importante, car le fit donne une valeur de  $f_0$  ridiculement précise.

**Remarques**

(source : Wikipédia, article « tuning fork »)

- Forme du diapason : telle qu'il y a des nuds au niveau de là où on le tient : ça évite d'annuler la vibration
- Le mode  $n = 2$  est à 2 octaves et demie du fondamental : c'est pourquoi on entend un son

aussi pur (solutions de  $\cos(x) \cosh(x) + 1 = 0$ )

- Diapason seul dans l'air : les deux ondes émises par les deux branches peuvent interférer et s'annuler, il faut une caisse de résonance
- Peut être sympa de montrer que le diapason est non-linéaire en regardant la résonance à 440 Hz

## 2.2 Influence des frottements

On peut éviter cette partie car mouiller le diapason rend difficile la reproduction des résultats.

- Plonger le bout du diapason dans l'eau
- Montrer que  $Q$  a décrû à l'aide du régime libre
- Montrer que  $Q$  décroît avec les frottements
- En fait, le facteur de qualité est lié aux pertes d'énergie de façon très générale!
- à voir : peut-être prendre 4-5 points sur un diagramme de Bode et montrer  $\omega_r < \omega_0$

### Attention

Les vagues générées par le diapason ont une amplitude proche de la profondeur de l'excitation : en réalité on n'a pas un terme de frottement fluide mais des frottements non linéaires.

**Transition :** On met deux circuits ensemble, avec les mêmes composants, on s'attend à ce que rien ne change

## 3 Circuits RLC couplés

Section qualitative uniquement. Pour des infos sur les calculs et les manip, voir [3] (section « Couplages »)

- Tracer le Bode d'un circuit RLC par wobulation
- Voir qu'il change lorsqu'on approche la bobine
- Mettre en évidence les deux pics de résonance
- Si on a le temps, estimer la valeur de  $M$  à l'aide des valeurs des fréquences de résonance  $f_+$  et  $f_-$ .

### Remarques

- Le mode antisymétrique est plus lent que le mode symétrique
- En présentant ceci on peut typiquement avoir des questions sur ce qui changerait sur le diagramme si les composants avaient des valeurs différentes... On a en fait une valeur critique du couplage  $\kappa = M/\sqrt{L_1 L_2}$ , telle que pour un couplage inférieur on n'observe d'un seul pic :

$$\kappa_c = \frac{1}{Q_1 Q_2}$$

et l'effet des capacités et résistances est important (à travers le facteur de qualité). Voir [2] et [3].

- L'expression générale des fréquences de résonance quand les composants sont tous différents se trouve dans [3] (toujours la section « Couplages »).

## Conclusion

- Résumé des expériences
- Le facteur  $Q$  est lié à la largeur spectrale en forcé et la longueur temporelle en libre
- Nombre de résonances : lié au nombre de degrés de liberté
- Résonances paramétriques (et non linéaires si l'on veut)

**Fil directeur** Différents couplages, et importance du nombre de degrés de liberté.

### Bibliographie

[1] *Chaîne d'oscillateurs couplés*. 40.

### Matériel

- Bobines en montage Helmholtz, deux transformateurs d'isolement, deux GBF, deux condensateurs et un oscilloscope.
- Pendules simples avec fils de couplage par torsion
- Plaquette de 8 oscillateurs couplés, GBF, oscilloscope et ordinateur interfacé avec l'oscilloscope.

## Introduction

Les oscillateurs sont présents absolument partout en physique, et on les utilise pour modéliser des situations très variées. On veut comprendre les phénomènes derrière les différents couplages et la levée de dégénérescence.

## 1 Couplage inertiel

### Expérience

Fréquences de résonance de deux circuits LC couplés

- Commencer par montrer (par wobulation) les deux fréquences quand on n'excite que d'un côté, et que si on excite des deux côtés on a un mode ou l'autre et qu'il n'y a plus qu'une seule fréquence de résonance.
- Utiliser des bobines dont on contrôle l'éloignement : Helmholtz ou deux Leybold avec une règle.
- Obtenir  $f_+$ ,  $f_-$ , tracer  $\theta = f(d)$ .

**Transition :** Autre type de couplage possible dans l'équation différentielle.

## 2 Couplage élastique

### Expérience

Couplage élastique de deux pendules

- Bien équilibrer les pendules en préparation
- Qualitativement : existence de deux modes, transferts périodiques d'énergie.
- Vérification de la formule des battements.
- Commencer par ajuster une petite portion de la courbe de battements pour se faciliter la tâche. Si l'ajustement ne fonctionne pas, ne pas y passer 3 heures : compter les périodes à la main.



**Attention**

Dans l'ajustement, ne pas oublier que la période apparente des battements est bien 2 fois plus grande que la période que l'on mesure.

**Transition :** Que se passe-t-il si on couple plus de deux oscillateurs ?

**3 Couplage de  $N$  oscillateurs****Expérience**

Couplage de 8 circuits LC ([1])

- Les circuits étant couplés par les capacités, on a affaire à un couplage *élastique*.
- Réaliser une wobulation pour voir directement les résonances. Faire une acquisition par diagramme de Bode.
- Montrer que pour 2 circuits on a bien couplage élastique : la fréquence du mode symétrique est inchangée, et le mode antisymétrique est de fréquence supérieure.
- Ajouter des oscillateurs, et pour  $N = 8$  ajuster par la formule de la notice :

$$\omega_p = 2\omega_0 \left| \sin \left( \frac{p\pi}{N+1} \right) \right|$$

**Remarques**

Techniquement, les oscillateurs de cette plaquette sont couplés par couplage élastique, il est donc plus logique de faire le couplage élastique juste avant. Cependant, ce n'est pas du tout critique pour le fil rouge du montage.

**Conclusion**

Ouvrir sur le nombre infini de degrés de liberté, amenant un nombre infini de résonances : corde de Melde, Fabry-Pérot...

**Fil directeur** Régimes transitoires à différentes échelles de temps

### Bibliographie

- [1] Michel KROB. *Électronique expérimentale*. ellipses, 2002.  
 [2] *Mesure du coefficient de diffusion du glycérol dans l'eau*. 569.

### Matériel

- Laser, lentille cylindrique, mélange glycérol-eau, support élévateur, écran et papier millimétré.
- GBF, ampli de puissance, deux résistances variables, une bobine et un condensateur.
- Oscilloscope avec interfaçage à l'ordinateur.
- AO avec alim, 3 boîtes AOIP, une résistance variable, deux condensateurs et un oscilloscope.

## Introduction

Définition : ce qui se passe lorsqu'on passe d'un état stationnaire à un autre état stationnaire. C'est présent dans tous les domaines de la physique, à toutes les échelles de temps! On ne va d'ailleurs pas toujours vers un état d'équilibre...

## 1 Régime transitoire aux temps longs

### Expérience

Diffusion du glycérol dans l'eau ([2])

- Lancer la manip une heure avant le début de la présentation, en faisant bien attention à ajouter le glycérol doucement au fond de la cuve.
- Prendre quelques points face au jury tout en expliquant le fonctionnement.
- Par ajustement, remonter au coefficient de diffusion du glycérol dans l'eau :

$$z = \frac{A}{\sqrt{t - t_0}} \quad \text{où} \quad A = \frac{(n_g - n_e)c_0 d}{2\sqrt{\pi D}}$$

- Le temps  $t_0$  peut potentiellement se justifier par le fait que aux temps courts, le faisceau se fait dévier dans une zone encore homogène et tout se passe comme si la cuve était plus courte.

### Attention

- Il ne faut pas trop faire vibrer la table sur laquelle a lieu l'expérience!
- Bien penser à noter la position du laser initiale *pour une cuve remplie*.

## 2 Régime transitoire aux temps courts

**Expérience**

Régime transitoire du circuit RLC

- Utiliser des crêteaux de basse fréquence (environ 10 Hz)
- Ajustement du régime pseudo-périodique :

$$u(t) = A \exp\left(-\frac{\omega_0}{2Q} t\right) \cos\left(\omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} t + \varphi\right)$$

- Mettre un ampli de puissance pour se débarrasser de la résistance de sortie du GBF.

**Transition :** On n'a vu pour le moment que des régimes transitoires évoluant vers un état d'équilibre.

**3 Régime transitoire vers un état instable****Expérience**

Oscillateur à pont de Wien

- Montrer la résistance critique pour laquelle il y a début des oscillations. C'est moins critique ici, on s'intéresse surtout à l'apparition des oscillations.
- Pseudo-période, incrément logarithmique ([1] p 137)
- Incertitudes pour  $\alpha$  : remarquer que  $1/\alpha^2 = 1 + 4\pi^2/\delta^2$ .

**Attention**

Pour cette expérience, porter une attention particulière au choix du transistor (pas le 071 ni le 081)!

**Conclusion**

Influence du facteur de qualité sur la durée du régime.

**Fil directeur** Phénomènes de transport dans plein de domaines différents

### Bibliographie

[1] *Mesure du coefficient de diffusion du glycérol dans l'eau*. 569.

### Matériel

- Laser, lentille cylindrique, mélange glycérol-eau, support élévateur, écran et papier millimétré.
- Bain thermostaté, alimentation stabilisée, ampèremètre, voltmètre, fil de cuivre, thermocouple.
- 

## Introduction

Différents types de transport (chaleur, charge, etc.), et différents modes (diffusion, convection, rayonnement...). On va se concentrer sur la diffusion, plus accessible à l'expérience et très riche en phénomènes intéressants.

## 1 Transport de particules par diffusion

### Expérience

Diffusion du glycérol dans l'eau ([1])

- Lancer la manip une heure avant le début de la présentation, en faisant bien attention à ajouter le glycérol doucement au fond de la cuve.
- Prendre quelques points face au jury tout en expliquant le fonctionnement.
- Par ajustement, remonter au coefficient de diffusion du glycérol dans l'eau :

$$z = \frac{A}{\sqrt{t - t_0}} \quad \text{où} \quad A = \frac{(n_g - n_e)c_0 d}{2\sqrt{\pi D}}$$

- Le temps  $t_0$  peut potentiellement se justifier par le fait que aux temps courts, le faisceau se fait dévier dans une zone encore homogène et tout se passe comme si la cuve était plus courte.

### Attention

- Il ne faut pas trop faire vibrer la table sur laquelle a lieu l'expérience!
- Bien penser à noter la position du laser initiale *pour une cuve remplie*.

## 2 Transport par conduction dans les métaux

### Expérience

Mesure de la conductivité électrique du cuivre

- Parler de la mesure à 4 points, qui permet de s'affranchir des résistances de contact.
- Prendre les points en température descendante, ne pas hésiter à ajouter de l'eau froide pour diminuer la température.
- Utiliser une alimentation en source de courant.

### Expérience

Mesure de la conductivité thermique du cuivre

- Prendre quelques points en préparation
- ajouter un point au début de la manip, et modifier la puissance afin d'avoir un autre point à la fin
- En préparation, mesurer le temps nécessaire pour atteindre le régime permanent.
- En supposant toute la puissance transmise au barreau :

$$P = RI^2 = \lambda \frac{\Delta T \times S}{L}.$$

- On n'a pas la bonne valeur, mais c'est dans le bon sens : on imagine que ça conduit mieux qu'en réalité puisqu'il y a des pertes.

### Conclusion

Ouvrir sur la convection et la difficulté de son étude (car facilement turbulences). Parler du rayonnement.

**Fil directeur** Différents types de moteurs fonctionnant sur des principes très variables.

**Bibliographie**

**Matériel**

- Moteur de Stirling, brûleur à alcool, oscilloscope interfacé avec un ordinateur, manomètre
- Moteur asynchrone, wattmètre, 3 multimètres (différentiels)
- Moteur à courant continu pour du qualitatif à la fin

**Remarques**

Il peut être intéressant tout au long de ce montage de donner des ordres de grandeur de puissance et des exemples de moteurs utilisés dans le commerce (voiture, train, etc.). Il faut aussi savoir expliquer le fonctionnement de chaque moteur, pour ne pas avoir l'air bête lors des questions du jury.

## Introduction

Moteur : convertit une énergie quelconque en énergie mécanique

### 1 Moteur thermique

#### Expérience

Rendement du moteur de Stirling

Peser la quantité d'éthanol au départ et à la fin : on en déduit la valeur de la puissance fournie

$$\mathcal{P}_f = \frac{\Delta m \times \Delta_{\text{comb}} h}{\Delta t_{\text{comb}}} \quad \text{avec} \quad \Delta_{\text{comb}} h = 25 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}.$$

Allumer le moteur juste après la pesée, comme ça il se met à fonctionner assez vite.

Bien expliquer comment on mesure  $P$  et  $V$  (étalonnages).

Acquisition de  $P$  et  $V$  à l'ordinateur. Tracé du cycle sur QtiPlot. Calcul de la primitive, on mesure l'aire  $A$  sur plusieurs périodes. Détermination de la période en traçant le déplacement en fonction du temps. La puissance utile vérifie  $\mathcal{P}_u = A/T$ .

Rendement (rapport de l'énergie utile  $-W$  et de l'énergie consommée  $Q_c$  sur un cycle) :  $\eta = \mathcal{P}_u / \mathcal{P}_f$ .

Comparaison avec le rendement théorique de Stirling (pas le rendement de Carnot!).

**Remarques**

Le rendement du moteur de Stirling est très mauvais, mais celui-ci reste utile car il permet de convertir en énergie électrique une chaleur qui serait potentiellement perdue. Typiquement, on en trouve dans les fours solaires.

**Transition :** Pour avoir un meilleur rendement, on peut utiliser un moteur non thermodynamique : le plus simple serait de créer un champ magnétique tournant.

## 2 Moteur asynchrone

### Expérience

Moteur asynchrone

- Expliquer les différents éléments qui constituent le moteur asynchrone : alimentation triphasée, couple, etc.
- Ajouter un point sur la courbe de  $\Gamma(\Omega)$  et  $\Gamma(\mathcal{P})$ .
- Trouver le rendement maximal.
- Attention, la puissance est le triple de ce qui est indiqué par le wattmètre!
- Comparer à la caractéristique souhaitée.
- Le moteur utilisé possède deux paires de pôles : la fréquence n'est pas 50 Hz!

### Attention

Afin d'avoir toujours la même puissance, il faut bien régler la fréquence du moteur sur le max (correspondant normalement à 50 Hz, fréquence optimale de fonctionnement).

**Transition :** On veut mieux contrôler la vitesse de rotation

## 3 Moteur à courant continu

Il vaut sans doute mieux ne pas faire cette partie afin de développer suffisamment les parties précédentes.

### Expérience

Étude du moteur à courant continu

- Règle accrochée à la table par des pinces et scotch sur la règle qui serviront de repères.
- Loi  $U = K\omega + Ri$ , ajuster  $\omega = AU + B$  car les plus grosses incertitudes sont sur  $\omega$ .
- La constante de couplage ne dépend pas de la masse
- Mesurer  $R_{\text{circuit}}$  et comparer à  $R$  de l'ajustement?

### Remarques

Il serait fondamentalement plus logique d'étudier le moteur à courant continu comme premier moteur électrique, mais en faisant comme proposé ici on gagne en souplesse temporelle...

## Conclusion

Ouvrir sur le moteur à courant continu si on ne l'a pas présenté, sinon ouvrir sur le moteur synchrone. Montrer que le choix d'un moteur est bien un compromis : accès au carburant, nécessité de puissance, etc.