

Plans de leçons et montages  
Agrégation de Physique-Chimie (option physique)  
Session 2019

Jules FILLETTE

21 juin 2019



# Table des matières

<b>I Montages</b>	<b>5</b>
1 Dynamique du point et du solide	7
2 Surfaces et Interfaces.	11
3 Dynamique des fluides.	13
4 Capteurs de grandeurs mécaniques	15
5 Mesures de températures	17
6 Transitions de phase.	19
7 Instruments d'optique	23
8 Interférences lumineuses.	25
9 Diffraction des ondes lumineuses.	27
10 Spectrométrie optique.	29
11 Émission et absorption de la lumière.	31
12 Photorécepteurs.	33
13 Biréfringence, pouvoir rotatoire.	35
14 Polarisation des ondes électromagnétiques.	37
15 Production et mesure de champs magnétiques.	39
16 Milieux magnétiques.	41
17 Métaux.	43
18 Matériaux semi-conducteurs.	45
19 Effets capacitifs.	47
20 Induction, auto-induction.	49
21 Production et conversion d'énergie électrique.	51
22 Amplification de signaux	53
23 Mise en forme, transport et détection de l'information.	61
24 Signal et bruit.	63
25 Mesure de fréquences temporelles (domaine de l'optique exclu).	65
26 Mesure de longueurs.	69
27 Systèmes bouclés.	71
28 Instabilités et phénomènes non-linéaires.	73

---

<b>29 Ondes : propagation et condition aux limites.</b>	<b>75</b>
<b>30 Acoustique.</b>	<b>77</b>
<b>31 Résonance.</b>	<b>79</b>
<b>32 Couplage des oscillateurs.</b>	<b>81</b>
<b>33 Régimes transitoires.</b>	<b>83</b>
<b>34 Phénomènes de transport.</b>	<b>85</b>
<b>35 Moteurs.</b>	<b>87</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>89</b>

**Première partie**

**Montages**



# MP n° 1 : Dynamique du point et du solide

PLAN : \_\_\_\_\_

1. Dynamique de la chute libre
2. Action des frottements solides
3. Étude d'un solide en rotation

BIBLIOGRAPHIE & RÉFÉRENCES DIVERSES : \_\_\_\_\_

1. [6] *Mécanique, tome 2*. Bertin-Faroux-Renault
2. [8] Bocquet, Faroux, Renault, *Toute la mécanique*.
3. [31] *Mécanique*. J.-P. Pérez.
4. [33] Quaranta I, tome de mécanique.

**Introduction :** La mécanique constitue le niveau primaire des enseignements de physique dans le supérieur, et pourtant elle présente nombre de subtilités dans la théorie, et est souvent abordée sous le spectre d'un certain nombre d'approximations qu'il va s'agir de valider ou infirmer.

## 1 Dynamique de la chute libre

Le premier exercice traité en physique c'est la chute libre : mouvement d'un corps lancé avec ou sans vitesse initiale sous le seul effet de l'action de pesanteur.

**Expérience :** Lâcher d'une balle de golf devant un écran blanc **muni d'une échelle de longueur de préférence verticale**. On filme, en s'assurant que l'écran est bien parallèle au champ de la caméra, et on analyse l'image pour extraire la trajectoire. Régler la caméra pour avoir la table le plus bas possible du champ de vision (il faudra voir le rebond de la balle) - en profiter pour faire une marque à la hauteur maximale (d'où on lancera la balle). Évaluer l'incertitude sur la position.

### Note sur l'utilisation de Cinéris :

- Mise en place : Déjà, il faut brancher la caméra rapide ExAO Jeulin **avant** de lancer cinéris...
- Acquisition : Régler le format d'affichage au maximum (ça fait moins d'image par seconde mais ça suffit et le champ est plus important), puis passer à l'onglet « vidéo rapide », nommer le fichier (vérifier le dossier d'enregistrement), prendre une vidéo de 5 s et lancer l'acquisition. Il y a un retard entre le moment où on appuie sur le bouton acquisition et le moment où la vidéo démarre réellement.
- Montage : Choisir pour début du film la première image où la balle apparaît entière, et comme fin une image avant que les rebonds deviennent tout à fait négligeables. Enregistrer le film en trame complète. C'est sur ce nouveau fichier que l'on va travailler.
- Traitement automatique : Dans *étalonnage*, fixer les axes (clic sur le point choisi pour origine) et l'étalon de longueur (clic-glisse sur la distance connue). Dans *cadre de travail*, réduire au maximum la taille de la fenêtre dans laquelle le mouvement a lieu. Dans *paramétrage*, définir l'objet que l'on veut suivre : sur une image où il est bien défini et net, cliquer sur l'objet et régler le seuil de contraste pour que lui seul soit sélectionné. Si le résultat est satisfaisant tant mieux, sinon il faut régler le seuil de contraste et appuyer à nouveau sur le bouton vert.
- Exportation : On copie-colle les colonnes une à une dans QtiPlot.

Pendant le montage on peut faire la vidéo, analyser le film et récupérer les données à copier dans le fichier QtiPlot déjà prêt...

### Trajectoire parabolique

**Expérience :** Sur les données  $z = f(t)$ , ajuster une parabole dont le coefficient dominant peut être comparé à  $g/2$ .

**Traitement énergétique - Très optionnel**

Expérience : De  $z(t)$ , déduire  $E_p$ ,  $v$  et  $E_c$ . On peut exprimer l'énergie mécanique  $E_m$  et discuter sa conservation : elle est à peu près conservée entre deux rebonds, mais l'énergie est dissipée lors du rebond, qui n'est donc pas élastique. On peut s'intéresser au coefficient de restitution entre deux rebonds (si on arrive à avoir suffisamment de rebonds, avec la balle de Golf, sinon avec la balle de ping-pong) qui doit être constant d'un couple de rebonds à l'autre puisqu'il caractérise le choc balle/table et ne dépend pas du mouvement lui-même - Noter qu'il est nécessairement compris entre 0 et 1.

Si on décide de faire le traitement énergétique, on peut regrouper dans un tableau les valeurs de  $E$  entre chaque rebond. La valeur de  $E$  correspondant au rebond est la moyenne de ces valeurs, l'erreur est, en gros, l'écart-type. On peut tracer le graphe  $E$  en fonction du numéro du rebond et tracer aussi la droite constante égale à  $E$  moyen, vérifier que les barres d'erreur ajustent bien.

**Transition :** Le sujet que l'on vient de traiter nous a permis de suivre un mouvement tout à fait ponctuel, à la fois du point de vue cinématique et dynamique. On va maintenant s'intéresser à un mouvement de solide en translation : la cinématique est toujours ponctuelle, mais la dynamique fait intervenir les frottements entre solides.

**2 Action de frottements solides**

Évidemment le coefficient de frottement statique n'est pas approprié ici vu le titre du montage. On cherche à caractériser l'action d'un solide sur un autre, notamment en déterminant le coefficient de frottement dynamique.

Expérience : On place un palais de masse  $m_1$  connue sur une planche en bois homogène la plus longue possible. Le palais est relié à une autre masse  $m_2$  suspendue à une hauteur  $h$  du sol par l'intermédiaire d'une ficelle et d'une poulie. Pour mesurer la hauteur de lâcher,  $h$ , on place une règle le long de la planche sur la table : on commence par repérer la position du palais lorsque la masse  $m_2$  est juste posée sur le sol, corde tendue. La hauteur entre  $m_2$  et le sol est alors la même qu'entre le palais et ladite marque. Au plus, la chute de la masse  $m_2$  ne doit pas entraîner  $m_1$  en dehors de la planche ! Lorsqu'on lâche la deuxième masse, la première parcourt sur la planche une distance  $h + d$ . Connaissant  $h$ , on déduit  $d$  pour différentes hauteurs de lâcher.

**Détermination du coefficient de frottement dynamique**

On trace  $m_2 h$  en fonction de  $m_2 d + m_1 (h + d)$  et on détermine le coefficient directeur. En effet (voir un exercice corrigé dans [8]),

$$f_d = \frac{m_2 h}{m_2 d + m_1 (h + d)}$$

Cette formule s'obtient par application des théorèmes énergétiques sur deux phases de mouvement. On compare le coefficient trouvé avec incertitude aux coefficients présentés sur [slide](#).

**Transition :** Que se passe-t-il si on passe à un niveau supérieur de modélisation en incluant l'aspect cinématique solide, par exemple sur un gyroscope en rotation.

**3 Étude d'un solide en rotation : le gyroscope**

Expérience : Équilibrage du gyroscope, mise en rotation du disque, déséquilibre. On mesure, par exemple sur un tour, la vitesse de rotation du disque  $\omega$  (moyenne des vitesses au début et à la fin du tour),  $\Omega$  (nombre de tour par seconde autour de l'axe vertical) et  $a$ , distance de la masselotte à la position d'équilibre.

A priori les données sont sur la notice, au cas où :  $m = 2,952 \text{ kg}$  et  $J = 3,3 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$ . On peut alors remonter (voir LP associée pour la théorie) au moment d'inertie du disque :

$$\Omega = \frac{mga}{J\omega}$$

**Conclusion :** Au cours de ce montage on a caractérisé la dynamique d'un objet ponctuel, puis une action propre aux solides, et enfin un mouvement de rotation répondant à une approximation dite gyroscopique. Il y a de nombreuses autres approximations en mécanique que nous pourrions nous attacher à tester (conservation de l'énergie, absence de frottements, liaisons idéales).



## MP n° 2 : Surfaces et Interfaces.

**PLAN :** \_\_\_\_\_

1. Contact entre deux solides
2. Grandeur caractérisant une interface liquide/gaz
3. Équilibre d'une interface élastique

**BIBLIOGRAPHIE :** \_\_\_\_\_

- [8] *Toute la mécanique*, Bocquet-Faroux-Renault
- [14] *Gouttes, bulles, perles et ondes*, P.-G. de Gennes et coll.
- [21] *Hydrodynamique physique*, Guyon-Hulin-Petit.
- Polycopié TP montrouge *Fluides et capillarité*.

**IDÉES À FAIRE PASSER :** \_\_\_\_\_

La description microscopique des surfaces et interfaces est un sujet complexe. Dès lors, comme tous les sujets complexes en physique, l'expérience est le meilleur moyen de pouvoir décrire les comportements statique et dynamique.

---

**Introduction :** Définir surface et interface. Il y a deux visions :

- L'une considère que les surfaces sont solides et les interfaces plutôt fluides.
- L'autre considère qu'une interface est une surface où ont lieu des phénomènes tels que la catalyse, des échanges de matière, etc...

### 1 Frottements entre deux solides

Proposer une première approche qualitative détaillée : présenter tout de suite la formule

$$f_s = \tan(\alpha)$$

et regarder l'influence de plusieurs paramètres sur l'angle : deux plaques de même matériau mais de différentes masses, même masse mais aires différentes... Comparaison avec des pincettes étant donné les états de surface etc...

#### Mesure de coefficient de frottement statique

Expérience : On se sert du dispositif adapté. On place un élévateur boy entre les deux planches pour pouvoir augmenter l'angle doucement et de manière continue (sans accoups). Penser à discuter de quelle référence on prend pour mesurer l'angle (a priori, le bas de la planche du haut...). Répéter l'expérience un maximum de fois pour faire une analyse statistique sur l'erreur.

Commenter la valeur trouvée à celles mises sur **slide** pour les coefficients statiques.

#### Mesure de coefficient de frottement dynamique

Par la technique déjà mise en place au MP1. Commenter la valeur trouvée à celles mises sur **slide** pour les coefficients dynamiques, et commenter le fait qu'ils soient plus faibles que les coefficients statiques (ça explique notamment qu'une fois que ça s'est mis à glisser ça continue, et on peut exploiter le déplacement des meubles).

---

**Transition :** L'interface solide-solide présente la simplicité d'une interface fixe, indéformable, mais une grande complexité au niveau de la description microscopique. On va étudier l'interface air-eau... et c'est un peu le contraire!

### 2 Grandeur caractérisant une interface liquide/gaz

L'interface liquide/gaz ou liquide/solide est caractérisée par un coefficient noté  $\gamma$  appelé tension de surface. On va mesurer ce coefficient ici.

Expérience : Mesurer la tension de surface de l'eau avec la balance d'arrachement (ENSP3071, notice 305). Bien laver la lame et le récipient à l'éthanol, utiliser de l'eau permutée, tout régler en précision; estimer **rigoureusement** les incertitudes.

Commenter la valeur trouvée à celles mises sur **slide** pour les tensions superficielles de différents matériaux et à différentes températures. On peut aussi une fois que la mesure est faite verser du savon sans le récipient et voir la valeur de  $\gamma$  changer.

**Transition :** Comment caractériser une interface élastique entre fluide? Des échanges peuvent avoir lieu et surtout il n'y a plus de rugosité à l'interface. Les interactions se décrivent bien mais la forme peut devenir compliquée.

### 3 Équilibre d'une interface élastique

Loi de Laplace :

$$P_{int} - P_{ext} = 4 \frac{\gamma_{air-eau}}{R_{bulle}}$$

sous l'hypothèse que la bulle est parfaitement sphérique (discutable éventuellement, mais on peut améliorer un peu l'approximation en essayant le bas de la goutte avec de l'essuie-tout) i.e.  $R_{int} = R_{ext} = R_{bulle}$ .

Expérience : Vérifier la loi de Laplace :  $P_{int} - P_{ext} = A/x$ ,  $x$  rayon des bulles et  $A = 4\gamma$  a priori. Projection de la bulle sur un écran avec diaphragme + lentille et passer par le grandissement pour trouver  $R$ . Cette manip sert surtout à vérifier la loi régissant l'interface, l'objectif en soit n'est pas de mesurer  $\gamma$ ; on a vu pour cela une méthode beaucoup plus précise ci-avant.

**Conclusion :** C'est effectivement compliqué à mettre en équation, mais expérimentalement on peut dire beaucoup de choses intéressantes!

## MP n° 3 : Dynamique des fluides.

**PLAN :** \_\_\_\_\_

1. Écoulement d'un fluide en régime laminaire
2. Dynamique autour d'un obstacle
3. Interface entre deux fluides

- [19] *Physique expérimentale*, E. Thibierge et coll.
- [21] *Hydrodynamique Physique*, Guyon-Hulin-Petit.
- Polycochés de TP Montrouge *Ondes II* et *Fluides & capillarité*.

**BIBLIOGRAPHIE :** \_\_\_\_\_

**IDÉES À FAIRE PASSER :** \_\_\_\_\_

La dynamique des fluides est un domaine complexe de la physique pour lequel la théorie devient rapidement inaccessible, et particulièrement calculatoire. L'expérience se dresse donc comme le seul moyen viable d'établir efficacement les lois régissant les divers phénomènes concernés.

**Introduction :** Définir les différents régimes de dynamique des fluides, le nombre de Reynolds. Exposer la logique du plan.

### 1 Écoulement d'un fluide en régime laminaire

La dynamique la plus simple apparaît aux faibles nombres de Reynolds :  $2rU/\nu \leq 2000$ . Typiquement un écoulement de Poiseuille avec une différence de pression pas trop grande. Commencer par évaluer le Reynolds dans cette manip et confirmer le régime laminaire.

**Expérience :** Sur la manip de Poiseuille, expliquer le principe du vase. Faire plusieurs mesures pour des différences de pression diverses. A chaque fois, attendre que le régime permanent soit établi, mesurer la différence de pression via  $\Delta P = \rho gh^2$ , le débit (en PESANT L'ÉPROUVETTE AVANT ET APRÈS L'EXPÉRIENCE) et remonter à la loi

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8\eta L}$$

**Transition :** C'est le cas simple d'un écoulement sans obstacle, laminaire, pour lequel la géométrie annule exactement le terme convectif dans Navier-Stokes. Que peut-on dire expérimentalement d'un écoulement autour d'une sphère rigide de rayon  $R$ ?

### 2 Dynamique autour d'un obstacle

Voir [21], p. 467 et [19] - Évaluer le nombre de Reynolds  $Re = 2Rv\nu$ . En régime visqueux ( $Re < 1$ ) on doit trouver la force de Stokes  $F = -6\pi\eta Rv$ . C'est elle que l'on mesure, ainsi que sa dépendance en le rayon de la sphère, pour la chute de billes dans un vase de glycérine. Ne pas oublier la poussée d'Archimède!

**Expérience :** Laisser tomber dans le vase une bille d'acier et suivre son mouvement via cinéris (cf. MP01). Évaluer la vitesse limite du mouvement, qui est liée aux forces exercées via le pfd. Il faut être particulièrement attentif à l'éclairage et au fond de cette manip pour détecter correctement la bille sur cinéris. Aussi, réfléchir à l'incertitude lié au mode d'acquisition.

Parmi les causes d'erreur on peut invoquer les effets de bords et la teneur en eau de la glycérine, hygroscopique, dont la viscosité dépend significativement de son âge (voir Handbook). Du fait que la viscosité est quasiment impossible à connaître rigoureusement cette manip a surtout pour objectif de vérifier la dépendance de  $R$  de la loi de Stokes et pas la mesure de  $\eta$  même si, une fois admise la loi de Stokes, elle donne un moyen efficace de faire une telle mesure (cf. viscosimètre à chute de bille, in cours de L3 FIP de M. Rabaud, p. 111.)

**Transition :** Que se passe-t-il enfin si on a plusieurs fluides en interaction?

### 3 Dynamique à l'interface entre deux fluides?

La déformation d'un des fluides entraîne la déformation de l'autre et vice-versa de sorte qu'un phénomène ondulatoire se met en place. On peut s'intéresser à déterminer la relation de dispersion de ces ondes.

Expérience : Monter la cuve à onde avec le stroboscope et l'oscilloscope associé pour la mesure de fréquence. Il faut prendre soin de très bien laver la cuve à l'éthanol avant de verser l'eau. Ne pas oublier de mesurer le grossissement dû à la projection en plaçant un objet sombre ou une règle graduée sur le verre et mesurer son image sur l'écran. On fait les mesures de  $\lambda$  pour différentes fréquences d'excitation (prévoir de faire plusieurs mesures devant le jury car l'eau se détériore rapidement et sa tension superficielle change - on peut même illustrer se point à la fin de la manip en versant du savon dans la cuve...). Pour plus d'efficacité on peut pointer les franges au pied à coulisse.

On doit remonter à :

$$\omega = \sqrt{\left(gk + \frac{\gamma}{\rho} k^3\right) \tanh kh}$$

Dans notre cas on va avoir  $h \approx 1$  cm et  $\lambda \approx 1$  cm de sorte que  $\tanh kh \approx \tanh 2\pi \approx 1$  et ce terme peut être négligé. De plus, on veillera à tracer  $\omega^2/k$  en fonction de  $k^2$  pour obtenir une droite d'ordonnée à l'origine  $g$  et de pente  $\gamma/\rho$ . Il y a un risque important que le  $\gamma$  ait changé entre la préparation et le passage, prévoir de refaire trois à quatre points devant le jury et comparer les deux droites obtenues.

**Conclusion :** La dynamique des fluides est un domaine complexe de la physique régi par une équation intrinsèquement non linéaire à l'origine de divers phénomènes. Nous en avons étudié quelques-uns ici, d'abord dans le cas où cette non linéarité se simplifie, puis dans des cas d'écoulements plus complexe que la théorie explique difficilement, ou a minima sous certaines approximation dont l'expérience permet de s'affranchir.

# MP n° 4 : Capteurs de grandeurs mécaniques

**PLAN :** \_\_\_\_\_

1. Caractéristiques d'un capteur de position
2. Étude d'un accéléromètre
3. Jauge de contrainte

**BIBLIOGRAPHIE :** \_\_\_\_\_

- [1] Asch, *Capteurs*.
- Polycopié de TP *Capteurs*.
- Voir aussi éventuellement [2]

**IDÉES À FAIRE PASSER :** \_\_\_\_\_

Ce montage est l'occasion de discuter les différentes caractéristiques usuelles des capteurs. Le fonctionnement interne des capteurs utilisés doit/peut aussi être abordé.

**Introduction :** Définir un capteur (cf. [1], p. 1) et le différencier d'un transducteur (convertit un signal physique en un autre). Nommer brièvement les caractéristiques que l'on va étudier dans le montage : gamme, linéarité, sensibilité, justesse, fidélité... Insister sur le fait que l'on va étudier des capteurs réels qui sont donc conçus pour minimiser les erreurs.

## 1 Caractéristique d'un capteur de position

La première grandeur mécanique que l'on peut vouloir mesurer est la position d'un objet. Il y a de nombreuses méthodes de mesure de position, dépendant principalement de l'échelle à laquelle la mesure doit être effectuée et de la précision attendue. On s'intéresse ici à un capteur de position d'une interface air/eau.

**Expérience :** Pour différentes hauteurs d'enfoncement du capteur dans l'eau on mesure au RLC mètre la valeur de la capacité, une première fois en enfonçant petit à petit le capteur dans l'eau, puis en sens inverse pour mettre en évidence l'hystérésis dû au mouillage. Remarque : contrairement aux indications de la notice, il faut mettre de l'eau distillée!

Sur ce premier capteur, on peut définir et commenter les valeurs de la gamme de mesure (intérêt assez limité...), de la précision comme toujours mais surtout de la finesse (cruciale ici!) et éventuellement de la réponse temporelle.

## 2 Étude d'un accéléromètre - Notice 285

### Connaître l'accélération théorique

Expliquer que pour étudier l'accéléromètre on a besoin de connaître la valeur d'accélération; détailler le protocole utilisé pour ce faire ( $a = r\dot{\theta}^2$ ) et introduire la fourche optique.

### Caractéristiques de l'accéléromètre

Il s'agit d'étudier le capteur accéléromètre, qui est réduit ici à un transducteur qui convertit l'accélération selon les trois axes en tension selon un protocole inconnu - En fait c'est a priori un capteur capacitif, voir notice N0285, p. 20.

**Expérience :** En faisant varier la distance de l'accéléromètre à l'axe, et la vitesse de rotation, on fait varier l'accélération radiale théorique. Relever pour plusieurs valeurs d'accélération théorique les tensions  $V_y$  et  $V_z$ . Aller un peu au-delà de la saturation.

On trace l'accélération mesurée par le capteur en fonction de l'accélération théorique. La courbe obtenue doit être une droite  $y = x$ . On commence par relever l'ajustement et comparer à cette équation théorique. On peut ensuite commenter :

- La gamme de mesure disponible, entre 0 et la saturation;
- L'écart des mesures par rapport à la théorie : discuter la fidélité, et la justesse qui à elles deux composent la précision;

- La sensibilité  $s = 1/V_y \frac{dV_y}{da_c}$  sachant que la linéarité implique que  $dV_y/da_c$  est en fait une constante. D'ailleurs, sa valeur peut-être comparée à une valeur théorique constructeur.

Une erreur possible d'erreur systématique pouvant expliquer le défaut de justesse est qu'on ne connaît pas avec précision la position exacte du capteur dans le boîtier! Donc en fait ici c'est une erreur un peu artificielle que l'on peut corriger aisément en translatant la courbe.

---

**Transition :** On a ici rencontré deux capteurs de grandeurs cinématique : des capteurs de position et d'accélération. On peut maintenant s'intéresser à un capteur de grandeur dynamique : la jauge de contrainte.

---

### 3 Jauge de contrainte

Présenter la Jauge de contrainte (**attention, la jauge c'est juste le transducteur orange sur le capteur!**). Décrire la chaîne du capteur : la contrainte est convertie en déformation qui est convertie en résistance qui est convertie en tension par le pont.

**Expérience :** Relever la tension affichée pour différentes valeurs de masses connues grâce à une balance de précision et allant de 0 g à la masse maximale.

On trace la tension en fonction de la masse. On peut exprimer la gamme de mesure, et la gamme de linéarité. Calculer la sensibilité (si c'est non linéaire, il faut dériver numériquement). On peut discuter efficacement la linéarité en accrochant une première masse, relevant la valeur de tension, puis doublant cette masse et attendre un doublement de la valeur de tension.

**Expérience :** Avec un ohmmètre suffisamment précis on peut refaire exactement la même manip en mesurant directement la résistance, sans pont. Discuter alors de la sensibilité et des intérêts/inconvénients de chaque protocole.

Il faut garder à l'esprit qu'on s'est servi de la jauge pour mesurer une force ici, mais on aurait aussi bien pu mesurer le déplacement du bout de la tige, ou dire que l'on mesure la masse, etc...

---

**Conclusion :** Chaque capteur a des avantages et des inconvénients qu'il s'agit de choisir et d'adapter en fonction du contexte et du dispositif étudié. On peut parfois sacrifier une partie de la précision au profit d'une large de gamme de mesure ou au contraire vouloir une précision et sensibilité très forte mais autour d'un point de fonctionnement restreint (ex : Le thermocouple Ni-Cr-Ni a une précision de  $\pm 1,5^\circ\text{C}$  sur une plage de  $-220$  à  $1150^\circ\text{C}$  et un temps de réponse de 1 ms alors que la résistance de platine a une précision de  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  sur une plage de  $-200$  à  $+200^\circ\text{C}$  et un temps de réponse inférieur à 9 s). Autre exemple de capteur pour lequel la finesse joue un rôle important : les sondes de température à résistance de platine qui échauffent leur environnement par effet Joule.

## MP n° 5 : Mesures de températures

### PLAN :

---

1. Mesure absolue de température
2. Étalonnage d'un instrument légal d'interpolation
3. Étalonnage d'un thermomètre à partir d'un instrument légal d'interpolation

### BIBLIOGRAPHIE :

---

- Polycopié de TP montrouge *Thermométrie*.
- [1] Asch, Capteurs. Le classique pour ce genre de montage!

### IDÉES À FAIRE PASSER :

---

La mesure de température peut être faite avec une très bonne précision car elle est rigoureusement normée selon un protocole précis que nous illustrons dans ce montage

**Introduction :** Les mesures de température se font en trois étapes (d'après l'EIT90) que l'on va tenter d'illustrer ici :

- On définit l'unité de température en fixant celle du point triple de l'eau à 273,16 K, et de là le rapport de deux températures est le même que celui de la quantité  $PV$  pour un gaz parfait.
- On mesure avec une grande précision les températures de 16 points de référence allant du point triple de l'hydrogène (à 13,8033 K) au point de fusion du cuivre (à 1357,77 K). Voir [1], p. 234 (les valeurs sont probablement à changer, voir livre).
- Enfin on définit les instruments légaux d'interpolation (thermomètre à gaz d'hélium, thermomètre à résistance de platine et pyromètre optique) à partir desquels on étalonne tout type de thermomètre.

## 1 Une mesure absolue de température

Exposer le principe. Faire une mesure de température à l'aide du rayonnement du corps noir sur une caméra infrarouge si possible. On peut exposer le principe du thermomètre à gaz, ou bien une mesure de vitesse du son (qui permet de remonter à  $T$ !).

**Expérience :** Mettre en place la manipulation de rayonnement du corps noir tel que le flux reçu par la thermopile est directement lié à la température du corps qui a émis le rayonnement. Le four est alimenté via un transformateur 220/220 V de sorte que l'on peut régler la tension d'alimentation, et la thermopile est reliée à un nanovoltmètre (calibre le plus précis). A confirmer mais a priori le meilleur moyen de faire les mesures consiste à chauffer le four le plus possible (on atteint près de 600°C) et relever la température et le signal de la thermopile au cours du refroidissement du four. Prendre garde à faire circuler l'eau à un bon débit! Plus de détails sur l'interprétation des signaux quand j'aurais fait la manip... Ne pas oublier de mettre un thermocouple bien au fond du four!

**Remarque :** Étant donnée le fonctionnement franchement chaotique de cette manip, et le fait qu'on ne puisse pas vraiment s'en passer dans quelques montages, je propose le compromis suivant. Commencer par cette manip en préparation, et prendre des points régulièrement espacés en puissance d'alimentation pendant les deux premières heures de sorte qu'à terme le four est au plus chaud. Faire alors une série de mesure en descente de température (il faut être derrière le four et prendre des points très régulièrement). NE PAS OUBLIER À LA FIN DE REMETTRE LE FOUR À CHAUFFER, ET COMMENCER LA DESCENTE DE TEMPÉRATURE UN PEU AVANT QUE LE JURY N'ARRIVE. La seule exploitation possible me semble être d'estimer **TRÈS PROPRESMENT** les incertitudes, d'ajuster les données par une loi en  $T^4$  et regarder le  $\chi^2$ . On peut quand même tester, le jour J, de laisser libre l'exposant... Et prier pour que ça tombe pas trop loin de 4!

**Transition :** C'est ce qui existe de plus efficace mais évidemment c'est pas pratique du tout, dans la vraie vie on veut des thermomètres.

---

## 2 Étalonnage d'un instrument légal d'interpolation

Expérience : Étalonner la résistance de Platine à différentes températures : point triple de l'azote, azote liquide bouillante en équilibre avec sa vapeur, eau liquide en équilibre avec la glace, et eau bouillante. Relever les points et interpoler la courbe par la formule de la notice. Vérifier les valeurs des coefficients. Une fois qu'on a la courbe on peut évaluer la sensibilité :  $\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$ . Discuter des erreurs en résistance et en température, celles en température peuvent être estimées à l'aide d'un thermocouple que l'on ballade dans le récipient étudié. On peut notamment remettre en cause, dans la plupart des cas, le fait que les phases soient à l'équilibre.

Remarque : la sonde perturbe la température localement par effet Joule. C'est détaillé dans la notice de la Pt100 (N455) mais je ne crois pas qu'il soit utile d'en parler ici, ou bien alors seulement comme cause d'erreur en température. Au passage, ça s'appelle la finesse d'un capteur.

**Transition :** Dernier étape, si je prend un thermomètre quelconque comment je sais quelle température il mesure? Comment on fait lien entre le signal qu'il renvoie et la température environnante?

## 3 Étalonnage d'un thermomètre à partir d'un instrument légal d'interpolation

Tout thermomètre est en fait initialement étalonné grâce à un instrument légal d'interpolation.

Expérience : Etalonner la thermistance (mesure de résistance de semi-conducteur) à partir de la sonde de platine. On plonge les deux dans un bécher d'eau que l'on chauffe progressivement et on relève des points au fur et à mesure de la montée (lente!) en température. Grâce à la partie précédente on peut passer de la résistance de la Pt100 à la température (voir formule d'inversion dans la notice) et ainsi convertir la résistance de la thermistance en température à son tour. Vérifier la loi exponentielle, et calculer la sensibilité sur la plage étudiée - c'est tout l'intérêt d'avoir des thermomètre secondaire : certes il faut les étalonner, mais du coup ils peuvent se permettre de fonctionner sur des plages plus petites et avoir par conséquent une sensibilité plus importante. On peut remonter à l'énergie de gap du semi-conducteur de la thermistance pour vérifier qu'on a pas fait n'importe quoi (ajuster le log de la résistance de la thermistance en fonction de  $1/T$ ). Voir [1], à partir de la page 265.

**Conclusion :** La mesure de température est un processus difficile qui doit cependant aboutir à des outils de grandes précisions. C'est ainsi un domaine très normé de sorte que la fabrication d'un thermomètre dans le but de faire des mesures précises et sensibles dans un gamme donnée doit suivre un schéma extrêmement tracé que nous avons détaillé ici.

**BONUS :**

- Regarder la dépendance des températures des équilibres étudiés avec la pression. En effet on suppose qu'on est à « la pression atmosphérique » mais en vrai elle varie au cours du temps et peut avoir une influence sur les températures d'équilibre.

## MP n° 6 : Transitions de phase.

PLAN :

---

1. Représentation graphique d'une transition liquide-vapeur
2. Aspect énergétique de la transition liquide-vapeur
3. Transition de phase du second ordre

BIBLIOGRAPHIE :

---

- [19] *Physique expérimentale*, Thibierge.
- Voir aussi [3], Quaranta II (thermodynamique).

IDÉES À FAIRE PASSER :

---

Les transitions de phase sont souvent difficiles à mettre en théorie et l'expérience permet de combler cet difficulté.

---

**Introduction :** Les transitions de phase en physique sont des phénomènes que les théories simples (gaz parfaits, champ moyen en dimension 1) échouent généralement à expliquer. Des théories un peu plus complètes (Van der Waals par exemple) permettent de préciser les choses, a minima de décrire la phénoménologie, mais seule l'expérience permet de décrire absolument le comportement des systèmes réels. C'est ce que nous allons faire dans ce montage.

### 1 Représentation graphique de la transition de phase du $SF_6$

Voir pour cette expérience la référence très complète [19], pp. 370 et suivantes.

Expérience (Étude du  $SF_6$ ) : Expérimentalement, il s'agit de relever pour un nombre important de températures les courbes  $(P, V)$  que l'on peut interpréter de multiples manières. On peut notamment tracer les isothermes dans le diagramme  $(P, V)$  et ajuster aux grands volumes et basses pressions par la loi des gaz parfaits (pour voir...) mais ça ne permet pas de décrire la transition de phase! On peut éventuellement caractériser le fluide par son développement du viriel... Enfin, il est assez simple d'évaluer la pression des paliers (avec incertitudes) qui sont les pressions de vapeur saturante pour les différentes températures et en ajustant par la relation de clapeyron déduire la chaleur latente du  $SF_6$ .

**Transition :** Le protocole précédent donne accès à une chaleur latente de vaporisation assez approximative. C'est une technique d'étude intéressante pour comprendre la phénoménologie et obtenir des connaissances sur le gaz réel, mais pas pour faire la mesure énergétique. Pour cela on présente une méthode plus précise.

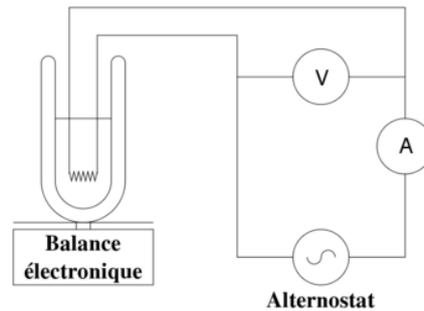
---

### 2 Aspect énergétique de la transition liquide-vapeur du diazote

L'objectif de cette partie est métrologique : on veut déterminer l'enthalpie de vaporisation de l'azote. On prend donc soin d'évaluer correctement les sources d'erreur et les incertitudes associées. On s'attend à trouver la valeur tabulée  $L_v = 196,5 \text{ J.g}^{-1} = 5,57 \text{ kJ.mol}^{-1}$  (source *L'élémentarium* et *wikipédia*).

Expérience (Mesure d'une chaleur latente) : Mesurer proprement la chaleur latente de vaporisation de l'azote (pourquoi pas de l'eau?) en prenant soin d'éviter les biais mentionnés plus bas.

- Il faut plonger le thermoplongeur le plus possible dans le liquide pour que tout la puissance de chauffage soit bien utile.
- Il faut évaluer la contribution de la poussée d'Archimède sur la masse. Par exemple en mesurant la contribution avant de chauffer et après le chauffage - de combien la masse varie-t-elle lorsqu'on retire le thermoplongeur du liquide? Puis prendre les deux valeurs comme incertitude, ou ajuster en supposant que cette contribution varie linéairement.



Pour l'exploitation, on a en dehors du chauffage et pendant le chauffage,

$$P_F = - \left( \frac{dm}{dt} \right)_0 L_v \quad \text{et} \quad U.I + P_F = - \left( \frac{dm}{dt} \right)_c L_v$$

donc :

$$L_v = \frac{U.I}{\left( \frac{dm}{dt} \right)_c - \left( \frac{dm}{dt} \right)_0}$$

*Remarque :* J'extrais ici cette remarque du rapport du jury 1999 qu'il est intéressant de lire avant de faire la manip : «Lorsqu'il s'agit de la chaleur latente de vaporisation de l'azote liquide à la pression atmosphérique, le protocole souvent mis en œuvre consiste à introduire une résistance chauffante dans le calorimètre Dewar; la détermination de l'énergie électrique consommée pendant un certain temps et la mesure de la masse du liquide vaporisé permettent de trouver l'enthalpie cherchée, [...] la détermination classique de l'incertitude (portant sur les mesures de masse, de temps, de tension et d'intensité) ne permet pas en général de justifier l'écart important entre la valeur de  $L_v$  ainsi déterminée et la valeur tabulée : le mode opératoire introduit en effet des erreurs systématiques qui doivent être prises en compte pour aboutir à un résultat corrigé. La manipulation est même un bel exemple pour illustrer ce sujet : l'hypothèse qui sous-tend la mesure est que toute l'énergie électrique consommée sert à vaporiser le liquide, or, en général, la résistance chauffante est loin de plonger toute entière dans celui-ci, à défaut de pouvoir résoudre totalement ce problème on se placera dans les conditions les moins défavorables possibles. De plus, si on n'y prête pas attention, la pesée du calorimètre contenant l'azote liquide prend en compte la poussée d'Archimède exercée sur la résistance chauffante qui varie évidemment avec le niveau du liquide; la vaporisation a lieu même si on ne chauffe pas, la correction nécessaire est facile à déterminer. Elle peut être non négligeable. Ce n'est qu'après avoir corrigé tous ces biais qu'on peut commencer à évaluer l'incertitude.»

**Transition :** Les transitions liquide-vapeur ne sont pas les seules qui existent. Elles appartiennent à une classe de transitions dites du premier ordre pour lesquelles l'énergie libre est discontinue, ce qui explique l'aspect énergétique. On va en étudier une du second ordre pour laquelle il n'y a pas d'enthalpie de transition de phase, la transition ferro-para.

### 3 Transition ferromagnétique-paramagnétique du fer

Expérience (Température de Curie du fer) : on chauffe un échantillon de fer en contact avec un aimant. A une certaine température, il se désaimante : c'est la température de Curie. On peut réaliser l'expérience plusieurs fois pour obtenir une statistique sur ladite température.

**Attention** au biais systématique : à cause du poids, l'aimant se détache non pas lorsque son aimantation s'annule, mais lorsque celle-ci ne permet plus de compenser le poids. On a ainsi tendance à sous-estimer la température critique.

A noter : avant la température de Curie, le fer a une aimantation permanente en champ nul, il est ferromagnétique. Après, l'énergie thermique devient suffisamment importante pour désordonner les moments magnétiques microscopiques et le fer devient paramagnétique.

**Conclusion :** On a distinguer deux grandes classes de transitions de phase : celles du premier ordre, dont l'exemple canonique est la transition liquide vapeur. Elles se font de manière discontinue et s'accompagne, du fait de la singularité dans le potentiel thermodynamique, d'une barrière énergétique à franchir. Aussi les transitions du second ordre, qui ne s'accompagne pas de tel barrière mais et pour laquelle on a déterminé la température de transition.

**BONUS :**

---

- Ce montage doit être quantitatif, la question de l'équilibre thermodynamique posée, et les mesures à la volée proscrites.
- Je pense que ça peut être une bonne idée de penser à quelques autres exemples de transition de phase, leur ordre, leurs caractéristiques, ... avant les questions!



## MP n° 7 : Instruments d'optique

**PLAN :** \_\_\_\_\_

1. Limites à l'utilisation des lentilles simples
2. La lunette astronomique
3. Choix du nombre d'ouverture

**BIBLIOGRAPHIE :** \_\_\_\_\_

- [22] Houard, Optique (lecture, même partielle, plus que recommandée!)
- [34] Sextant, Optique expérimentale
- On peut aussi regarder le Duffait d'optique [16]

---

**Introduction :** Le but de ce montage est d'expliquer le fonctionnement d'outils optiques qui nous permettent d'obtenir des images des objets qui nous entourent à différentes échelles (microscope, appareil photo, lunette) et d'en comprendre leurs limites.

### 1 Limites à l'utilisation des lentilles simples

L'instrument d'optique le plus commun est la lentille, mais son intérêt est limité (faible grossissement, encombrement important...) et elle présente des limitations importantes du fait de sa forme (abérations géométriques) et de sa composition (abérations chromatiques). Pour qu'elles soient bien mesurables on exagère le trait en prenant une lentille de 30 cm non corrigée. Voir Sextant [34], pp. 12, 17, 37, 41.

**Expérience :** On met en évidence deux types majeurs d'aberration (voir mesures?) :

- **Géométriques :** dues à l'écart aux conditions de Gauss (ici que sphérique). Nappe sagittale et tangentielle + règle des 4 P.
- **Chromatiques :** proviennent de la variation d'indice des verres avec la longueur d'onde. On peut mesurer quantitativement le pouvoir dispersif du verre de la lentille.

---

**Transition :** Une fois qu'on a corrigé ces défauts, on peut associer les lentilles pour faire des instruments d'optique plus performants. Par exemple, un des plus réputé, la lunette astronomique.

### 2 La lunette astronomique

**Expérience :** Monter la lunette (système afocal) présenter l'objectif et l'oculaire. On modélise l'œil par une lentille permettant d'observer les images sur un écran, et on modélise une étoile en envoyant une fente à l'infini. Bien faire la différence entre le dispositif créant l'image, celui modélisant l'œil, et les deux lentilles qui constituent effectivement la lunette. Mesure du grossissement (et non le grandissement car l'objet est à l'infini) et comparaison à  $G = -f_{ob}/f_{oc}$  donc il faut **choisir un objectif de grande focale ( $f'_{ob} \approx 50$  cm) et un oculaire de petite focale ( $f'_{oc} \approx 15$  cm).**

Mettre en évidence le cercle oculaire (lieux de convergence de tous les rayons passant à travers l'objectif) car c'est à cet endroit qu'on place l'œil pour avoir le maximum de champ. Il existe car la source n'est pas ponctuelle et pas tout à fait à l'infini.

Mettre en évidence la limitation par diffraction, en pratique, le grossissement ne dépasse jamais 100-200 : ce n'est pas une limite technologique mais liée à la diffraction. Montrer qu'en changeant l'oculaire, la limite de séparation de deux fentes objets reste la même. En pratique on veut des lunettes de grand diamètre.

Mettre en évidence les rôles des diaphragmes de (largeur de) champ et d'ouverture, pour la limitation de la luminosité et du champ. Le champ est la partie visible de l'objet à travers l'instrument, et l'ouverture sélectionne les rayons incidents selon l'angle qu'ils forment avec l'axe optique. Trouver les deux diaphragmes. *A savoir :* Pour augmenter le champ d'une lunette, on utilise une lentille de champ ([34], p.46)!

**Transition :** On a mis en évidence l'influence du diaphragme sur la largeur de champ. Comment jouer sur la profondeur lorsqu'on veut, par exemple sur un microscope ou un appareil photo, avoir une image dont tous les plans sont nets?

---

### 3 Nombre d'ouverture d'un appareil photo

[34], p. 34-35 - Présenter les caractéristiques de l'objectif (bague de netteté, bague d'ouverture).

Expérience (nombre d'ouverture et profondeur de champ) : On incline la grille et on regarde qualitativement combien de carreaux sont nets selon le nombre d'ouverture choisi. Plus le diaphragme est fermé, plus la profondeur de champ est grande. **Attention :** sur l'objectif d'appareil photo de Montrouge, un des nombres d'ouverture est inaccessible.

Expérience (nombre d'ouverture et éclairement) : un grand NO diminue fortement l'intensité lumineuse reçue par la pellicule. On peut ajuster la dépendance en  $1/NO^2$  de l'intensité reçue sur la pellicule. **Attention :** sur l'objectif d'appareil photo de Montrouge, un des nombres d'ouverture est inaccessible.

Il y a donc un compromis à faire entre profondeur de champ et éclairement!

**Conclusion :** Les instruments d'optique répondent chacun à un objectif particulier lié à l'usage que l'on veut en faire. On a alors pour chacun des compromis à faire entre différents arguments.

**BONUS :**

---

1. Les candidats doivent connaître et comprendre les conditions d'obtention d'images de bonne qualité

## MP n° 8 : Interférences lumineuses.

PLAN :

1. Dispositifs à division du front d'onde
2. Dispositifs à division d'amplitude

BIBLIOGRAPHIE :

- [22] *Optique*, Sylvain Houard.
- [34] Sextant, *Optique expérimentale*.
- Polycopié de TP montrouge *Interférences*.
- TD d'interférences de C. Sayrin

IDÉES À FAIRE PASSER :

Il faut faire apparaître les conditions d'obtention des interférences dans les deux cas, les points communs, différences, avantages et inconvénients des deux types de dispositif.

**Introduction :** Historique (dans [22]). Mise en œuvre de dispositifs interférentiels. Utilité actuelle (mesure de distance de l'ordre de la longueur d'onde - Virgo, vélocimétrie laser, ...)

### 1 Interférences par division du front d'onde

#### Formule de Fresnel

On fait le réglage devant le jury, on mesure avec précision les différents paramètres à mettre dans l'ajustement (notamment la focale de la lentille/distance fente-écran).

Expérience : On utilise dans un premier temps une bifente étalonnée illuminée par un laser élargi. Dans un premier temps on peut éclairer les trois bifentes et regarder qualitativement l'influence de leur taille/écartement. Ensuite on cache les deux extrêmes et, à l'aide d'une caméra CCD on vérifie la formule de Fresnel : faire un ajustement par

$$A * \left( \frac{\sin(\pi a_{larg}(x-x_0)/(\lambda D))}{\pi a_{larg}(x-x_0)/(\lambda D)} \right)^2 * \left( 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \frac{a_{ecartement}(x-x_0)}{D} \right) \right) + B$$

avec  $a_{larg}$  la largeur d'une fente et  $a_{ecartement}$  l'écartement entre les deux fentes et remonter à la valeur de la largeur de la bifente, la comparer à la valeur tabulée.

**Attention à l'ajustement :** Les grandeurs qui sont parfaitement connues peuvent être inscrites en inconnues dans la formule, mais leur valeur doit être fixée dans l'assistant d'ajustement! Pour tous les paramètres il faut donner au logiciel des cibles précises pour qu'il s'en sorte.

#### Caractéristiques des interférences par division du front d'onde

Expérience : Observer la non-localisation des franges sur l'écran. Passer en lumière blanche ou *a minima* en raie spectrale, typiquement la raie verte du mercure et montrer le cône de cohérence temporelle et en élargissant la fente, la perte progressive de cohérence spatiale. [22], p. 209.

**Transition :** La perte de cohérence spatiale est dramatique car elle empêche d'avoir des figures d'interférences suffisamment lumineuses (on ne peut pas étendre la source et avoir une trop grande différence de marche). On dispose donc de dispositif dits à division d'amplitude pour lesquels la différence de marche entre la source et l'écran ne dépend pas de la position de la source.

## 2 Interférences par division d'amplitude

On procède en trois étapes : cohérence temporelle sur la raie verte du mercure, localisation des franges en passant de la lame d'air au coin d'air et cohérence temporelle (teintes de Newton, blanc d'ordre supérieur, ...) en coin d'air de lumière blanche.

Dans un premier temps on reste sur la raie verte du mercure, et on va montrer que les interférences peuvent nous renseigner sur la source de lumière utilisé en étudiant la perte de contraste qui est liée à une perte de cohérence temporelle elle-même liée à la largeur de la raie (les différents  $\nu$  de la raie n'interfèrent pas ensemble : leurs éclaircissements se somment et brouille les franges).

Expérience : On règle le michelson en lame d'air et on utilise le moteur. D'un côté à l'autre de la figure d'interférence (ou au moins sur une moitié de l'interférogramme...) on se place en différents points, on allume le moteur et on enregistre le signal relevé par l'ensemble photorésistance + oscilloscope. On peut alors calculer le contraste :  $C = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} + V_{min}}$

Le contraste est la TF du profil de raie. On l'ajuste par une gaussienne (raie gaussienne) ou une exponentielle décroissante (lorentzienne). On peut discuter de la forme devant le jury et remonter à la longueur de cohérence de la source. Voir TD de C. Sayrin. OdG pour la Lumière blanche :  $\delta\lambda \approx 400 \text{ nm}$ ,  $\tau \approx 10 - 15 \text{ s}$  donc  $l_c \approx 1 \mu\text{m}$ . Pour une raie spectrale :  $\delta\lambda \approx 0,03 \text{ nm}$ ,  $\tau \approx 10 - 11 \text{ s}$  donc  $l_c \approx 10 \text{ mm}$ . Pour illustrer la même chose en lumière blanche, on va passer en coin d'air.

Expérience : On revient au contact optique et on passe de la lame d'air au coin d'air. Il faut changer l'illumination et la projection. C'est l'occasion de discuter de la localisation des franges!

Expérience : En élargissant le coin d'air, l'interfrange rétrécit et on voit tout l'interférogramme de sorte qu'on voit très bien la perte progressive de cohérence temporelle : les figures d'interférence des différents longueurs d'onde se superposent petit à petit jusqu'à annuler complètement le contraste : c'est le blanc d'ordre supérieur!

**Conclusion :** Récap des deux cas, avantages de la division du front d'onde - pas de localisation donc on peut regarder où on veut : c'est pratique si on ne veut pas avoir de dispositifs optiques trop complexes, mais en contre partie on perd rapidement la cohérence spatiale Vs division d'amplitude - plus de perte de cohérence spatiale : tous les rayons qui arrivent en un point de l'écran on subit la même différence de marche quel que soit leur point d'origine sur la source, en contre-partie on a localisation des franges.

### BONUS :

1. Les connaissances théoriques sur les cohérences spatiale et temporelle doivent être reliées aux observations expérimentales. Enfin, il est judicieux de réaliser des expériences simples avant de se lancer dans des expériences sur les notions de cohérence.
2. **On dit interférogramme, pas spectre!** Un interférogramme représente l'intensité en fonction de la position, le spectre représente la densité spectrale d'énergie en fonction de la longueur d'onde/fréquence!

# MP n° 9 : Diffraction des ondes lumineuses.

**PLAN :** \_\_\_\_\_

1. Diffraction de Fraunhofer par une fente simple
2. Résolution de l'objet diffractant
3. Application au filtrage spatial

**BIBLIOGRAPHIE :** \_\_\_\_\_

1. [19] *Physique expérimentale*, Thibierge.
2. [34] Sextant, *Optique expérimentale*.

**IDÉES À FAIRE PASSER :** \_\_\_\_\_

Mesurer les principales et caractéristiques de la diffraction, et illustrer les utilisations du phénomène.

**Introduction :** La diffraction est un phénomène purement ondulatoire qui apparaît lorsque la lumière rencontre une importante variation d'indice optique sur une échelle plus petite ou de l'ordre de la longueur d'onde. Cela arrive systématiquement lorsque un faisceau lumineux est brusquement coupé.

## 1 Diffraction simple par une fente unique

On travaille dans les conditions de Fraunhofer : diffraction d'une onde plane (source à l'infini) visualisée à l'infini.

**Expérience :** Réaliser le montage de Fraunhofer devant le jury. On éclaire une fente par une lumière spectrale + filtre interférentiel (on va faire bcp de laser après, donc on varie ici, et en plus c'est plus simple de faire l'acquisition CCD avec autre chose que le laser. Une fois que le réglage est fait on peut enlever le filtre normalement). Montrer qualitativement la diffraction : quand on rétrécit la fente la figure s'élargit, observer que la translation du diaphragme dans son plan ou selon l'axe optique ne change rien. La direction de la diffraction est perpendiculaire à la direction de la fente. On focalise l'image sur une CCD et on fait un ajustement du profil de diffraction pour remonter à la largeur de la fente étalonnée.

**Transition :** Comment la diffraction peut-elle servir à faire des mesures?

## 2 Résolution de l'objet diffractant

La diffraction dépendant aussi de l'objet, on peut, connaissant les caractéristiques de la sources, accéder à celles de l'objet.

**Expérience :** On diffracte un faisceau laser élargi (et idéalement parallèle) par une poudre de Lycopodes déposée sur une lame de verre (la poudre est assimilable à un ensemble de  $N$  pupilles sphériques réparties aléatoirement) et faire l'image sur un écran. On remonte à la taille d'un lycopode via la première annulation d'intensité de rayon  $r = 1,22\lambda f' / d$ .

Éventuellement, on peut commencer cette partie en regardant la tâche de diffraction par un trou pour observer la tâche d'Airy et mettre en évidence le théorème de Babinet. D'ailleurs, avec la poudre, on obtient la même figure de diffraction mais  $N$  fois plus intense (voir LP36 pour la théorie)!

**Transition :** La diffraction apparaît généralement comme une limite à la formation des image, notamment du fait qu'elle entache l'image géométrique d'un halo de lumière. Est-ce qu'elle peut aussi aider à améliorer leur qualité?

## 3 Application au filtrage spatial

On présente une méthode expérimentale permettant d'améliorer la qualité des images en filtrant certaines fréquences spatiales.

Expérience (Expérience d'Abbe) : Monter la manip en expliquant les différents plans et les lien de transformation de Fourier entre eux, la faire en lumière blanche pour mieux voir et utilise la grille spécifique pour expérience d'Abbe (sur diapositive). Modifier les fréquences spatiales avec un filtre (typiquement une fente de taille et orientation variable).

Idéalement il faudrait trouver une image tramée que l'on peut filtrer + filtre passe-haut, passe-bas pour strioscopie, voir [19], p. 325.

**Conclusion :** La diffraction est souvent un phénomène limitant (dans les instruments optiques, pour la résolution) mais aussi un phénomène utile : le filtrage dans les images. Ouvrir sur la diffraction d'autres ondes que lumineuse selon ce que l'on veut sonder : rayons X ou électrons pour les tailles plus fine, typiquement les structures cristallines, ou neutrons (non chargés) si on veut sonder les noyaux sans être perturbés par les nuages électroniques.

**BONUS :**

- Tout le montage est effectué dans les conditions de Fraunhofer car c'est le cadre agréable de la diffraction. Il y a fort à parier que des questions tomberont sur la diffraction de Fresnel. S'y préparer!
- D'autre part, une autre application classique de la diffraction est l'utilisation pour obtenir des informations sur la source elle-même (typiquement diffraction par un réseau) mais pour moi cela fait plutôt partie du montage spectroscopie. Le filtrage me semble plus intéressant à présenter ici.

## MP n° 10 : Spectrométrie optique.

### PLAN : \_\_\_\_\_

1. Méthodes dispersives, repérage des raies.
2. Méthodes interférométriques, profil des raies.

### BIBLIOGRAPHIE & RÉFÉRENCES DIVERSES : \_\_\_\_\_

1. [9] *Spectroscopie instrumentale*, Bousquet
2. [16] Duffait d'optique.

3. [28] *Optique physique*, Mauras

4. [34] Sextant, *Optique expérimentale*.

5. BUP de Juin 1999, pp. 7-23

6. BUP d'Octobre 2014, pp. 1281 - 1296

7. Polycopié de TP *spectroscopie*

### IDÉES À FAIRE PASSER : \_\_\_\_\_

Il existe principalement deux types de spectromètres : dispersif, pour séparer, identifier et mesurer les longueurs d'onde des raies; et interférentiels pour accéder au profil spectral desdites raies.

*Remarque* : C'est un montage de spectroMÉTRIE. Par conséquent il est absolument crucial d'évaluer systématiquement et rigoureusement les incertitudes associées aux différentes mesures effectuées.

**Introduction** : Mixer les intros du Duffait (p.121) et du Sextant (p.215). Deux grands types de méthodes (dispersives et interférométriques) que l'on va illustrer et comparer, notamment du point de vue de la résolution en  $\lambda$ , et de l'estimation de la largeur spectrale.

## 1 Méthodes dispersives, repérage des raies.

### 1.1 Illustration avec un prisme à vision directe

Cette manip doit être très rapide. Elle sert à illustrer les compétences d'optique Propagation dépendant géométriquement de  $\lambda$ . Voir indice des verres, et dépendance de l'indice avec la longueur d'onde (polarisation du milieu, modèle de l'électron élastiquement lié).

*Remarque* : Les prismes à vision directe sont souvent faits de manière à ne pas dévier la raie jaune du sodium. De plus, il serait malvenu de faire une mesure au PVD alors qu'on dispose d'un outil de précision qu'est le goniomètre.

Expérience : On fait pas à pas le montage complet avec une lampe HgZnCd et un prisme à vision directe (cf. [34], p.216 schéma V.1). L'angle de sortie dépend de  $\lambda$ . On met aussi en évidence l'influence de la fente source : large, on a plus de lumière mais les raies sont plus larges aussi donc moins discernables; fine on a moins de lumière mais les raies sont mieux séparées, jusqu'à la limite de diffraction. Il faut viser un compromis (sur ce point, discussion intéressante dans [9], p. 16).

Problème du prisme : déviation limitée par la dispersion du milieu, compliqué d'atteindre des grandes valeurs avec un encombrement raisonnable (estimer la distance prisme/écran pour avoir la même résolution que le goniomètre), et déviation non linéaire. On passe au réseau + goniomètre pour plus de précision dans le repérage des raies.

### 1.2 Utilisation d'un réseau

Pour cette partie, voir la théorie sur les réseaux dans [28], p.201 et la partie expérimentale dans [34], p.221-223. On utilise la diffraction par une structure périodique (réseau de fentes), et la formule des réseaux pour mesurer la longueur d'onde d'une raie. Mettre en évidence l'influence du pas du réseau, de l'ordre d'observation.

Expérience : Étalonnage du spectromètre à réseau au goniomètre. On utilise une source lumineuse à plusieurs éléments (typiquement HgZnCd) pour avoir un maximum de raies connues et un étalonnage d'autant plus précis et un réseau de 300 traits/mm. On s'affranchit de la constante  $\sin(\theta_0)$  en traçant  $\theta_1 - \theta_{-1}$  en fonction de  $\lambda$  (pas besoin de diviser par deux etc...).

*Remarque* : La pente de la droite est, pour l'étude du premier ordre de diffraction, approximativement une fonction linéaire du pas du réseau. On peut discuter cette approximation, et vérifier qu'on obtient une bonne valeur pour le nombre de traits pas unité de longueur.

Expérience : Mesure de la longueur d'onde moyenne du doublet jaune du sodium : on remplace la lampe précédente par une lampe au sodium et on se sert de l'étalonnage. ATTENTION À NE RIEN FAIRE BOUGER D'AUTRE QUE LA LAMPE!

**Transition :** Le doublet jaune du sodium n'apparaît pas sur le spectre présenté. On peut l'expliquer en calculant la dispersion angulaire du réseau à l'ordre 1 [indépendante de  $\lambda$  contrairement au cas du prisme] et voir que le  $d\lambda$  engendre un  $d\theta$  plus petit que la précision de lecture due à la largeur de la fente. Comment peut-on le résoudre? Une solution pourrait-être d'améliorer le réseau mais c'est pas simple. Plus facile : faire interférer les deux raies.

## 2 Méthodes interférométriques, profil de raie.

### 2.1 Résolution d'un doublet

La théorie est bien expliquée dans [28], p.178.

Expérience : Mesure du doublet jaune du sodium par annulation du contraste (noter la réapparition des raies un peu plus loin, ce n'est donc pas une perte de cohérence temporelle). On mesure la période du battement qui permet de remonter simplement à l'écart en longueur d'onde (cf. [34], p.239-240) - faire un relevé sur plusieurs battements pour améliorer la précision, en vérifiant **grossièrement** que les annulations sont bien régulièrement espacées.

### 2.2 Largeur spectrale

Spectrométrie par transformée de Fourier. Voir théorie complète dans [28], p.178. Voir aussi [34], p.239.

Expérience : Largeur spectrale de la raie verte du mercure. La décroissance de contraste est ici liée uniquement à la perte de cohérence temporelle. Cette expérience reste qualitative (cf. [34], p.240-241).

*Remarque :* On pourrait le faire avec le doublet du sodium mais les raies sont beaucoup plus fines donc c'est (très) long! D'ailleurs, on peut aussi le faire à la main en prenant des valeurs au multimètre.

**Conclusion :** Les deux grands types de spectromètres que nous avons étudiés ont chacun leur utilité propre : les spectromètres dispersifs sont utilisés pour MESURER LES LONGUEURS D'ONDE ; les spectromètres interférométriques sont utilisés pour RÉSOUDRE LE PROFIL DES RAIES SPECTRALES.

#### BONUS

1. Autres idées de manip : spectre d'émission absorption de la rhodamine (cf. [34], p.226) ou mesure de la constante de Rydberg sur le spectre de l'hydrogène (cf. [34], p.228).
2. Protocole de réglage du goniomètre : voir Poly de TP *spectroscopie*. Il faut suivre les étapes minutieusement, et ne pas hésitez avant de se lancer dans le réglage à retrouver toutes les vis importantes. Penser notamment à régler dès le début l'alignement vertical de la lunette et du collimateur.
3. Il n'est pas question de mesurer des longueurs d'onde par spectrométrie interférentielle.

# MP n° 11 : Émission et absorption de la lumière.

PLAN :

---

1. Absorption de la lumière par un semi-conducteur
2. La rhodamine
3. Émission spontanée par l'hydrogène

BIBLIOGRAPHIE :

---

- [16] Duffait d'optique
- [34] Sextant

IDÉES À FAIRE PASSER :

---

L'interaction entre rayonnement et matière peut donner lieu à trois processus principaux : l'absorption du rayonnement par la matière, la réémission du rayonnement par la matière à une longueur d'onde plus grande (énergie) ou l'émission spontanée du rayonnement par la matière.

**Introduction :** La compréhension des phénomènes lumineux est a priori simple : tout lycéen sait que la lumière est émise par une source primaire, puis réfléchiée par les sources secondaires, et qu'elle peut-être absorbée ou transmise par différents objets qui en deviennent colorés. Fondamentalement, c'est un processus beaucoup plus subtil qu'il s'agit d'illustrer quantitativement ici.

## 1 Absorption de la lumière par un semi-conducteur

La couleur des objets vient le plus souvent du fait qu'ils absorbent une partie de la lumière qu'il reçoivent. Présenter sur [slide](#) le cercle des couleurs complémentaires.

**Expérience :** Illustrer que la couleur apparente de l'échantillon de GaP est liée au fait qu'il absorbe une partie du spectre à cause de son énergie de gap. On peut quantifier la chose en cherchant la longueur d'onde d'extinction grâce à l'ensemble illuminateur + monochromateur, mais ça n'est pas forcément le but du montage.

L'énergie du rayonnement est  $E_r = hc/\lambda$ . Tant que cette énergie est inférieure à l'énergie de gap, la lumière passe. Si cette énergie devient supérieure à l'énergie de gap, le rayonnement excite des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction : le rayon est absorbé (et on crée des porteurs de charge mais c'est pas le sujet ici).

**Transition :** Certaines substances sont capables d'absorber la lumière et d'en ré-émettre une partie : c'est le cas de la rhodamine. On va se servir d'un spectrophotomètre pour observer ces deux phénomènes (les semi-conducteurs sont présents dans les appareils photo et les spectrophotomètres).

---

## 2 La rhodamine

### Spectre d'absorption de la rhodamine

**Expérience (très facultative) :** Observation qualitative du spectre d'absorption de la rhodamine avec un prise à vision direct.

Manipulation quantitative :

**Expérience :** Obtenir le spectre d'absorption de la rhodamine grâce à l'alignement Lampe Philora (pour ensuite pouvoir sélectionner la raie verte qui favorise l'émission) + filtre antithermique + diaphragme + cuve + spectro usb. Éventuellement on peut placer des polariseurs croisés pour moduler l'intensité. En déduire la longueur d'onde d'absorption principale, commenter par rapport à la couleur de la rhodamine - la rhodamine est rose : elle absorbe le vert!

### Spectre d'émission de la rhodamine

Expérience : Exciter le colorant par une lumière monochromatique dans un domaine où il absorbe bien - cf exp précédente : le vert, par exemple la raie du mercure! On peut alors mettre en évidence la réémission orange par la rhodamine. On place cette fois le spectro sur le côté et on relève le spectre d'émission (bien noter qu'on a pas de blanc possible pour cette mesure...). On a perdu en énergie donc  $\lambda$  a augmenté!

---

**Transition :** La dernière question qu'il reste à aborder, c'est comment on fait une source primaire de lumière?

---

## 3 Émission spontanée par l'hydrogène

Spectre d'une lampe à hydrogène ([34], p. 228 et [16], p. 134)

Expérience : Régler le goniomètre. Étaler le spectre de la lampe à hydrogène grâce à un réseau (a priori plutôt 600 traits par mm). Relever les angles, pour chaque raie d'intérêt, des ordres 1 et -1. On applique alors la formule des réseaux  $\sin(\theta) - \sin(\theta_0) = p\lambda/a$  de sorte que, avec  $\theta_{-1} = -\theta_1$  il vient  $\sin(\theta_1) = p\lambda/a$ .

*Remarque :* La série de Balmer contient 4 raies principales visibles à 410,2 nm (violet - à peine visible,  $n = 6$ ), 434,1 nm (violet,  $n = 5$ ), 486,1 nm (bleu turquoise,  $n = 4$ ) et 656,3 nm (rouge,  $n = 3$ ) qu'il s'agit de repérer, et d'ajuster par :

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

Les transitions pour  $n$  supérieur ne sont plus visibles.

#### Conclusion :

#### BONUS :

1. Il y a beaucoup de manip dans ce montage mais il est nécessaire d'illustrer les différents processus d'interaction lumière/matière.
2. Ce montage pourrait probablement être présenté tout à fait dans l'autre sens : émission spontanée, émission stimulée, absorption... les deux logiques se tiennent.
3. Réalisation d'un relevé de spectre au spectro-USB : il faut déjà connecter le spectro à l'ordi, et ouvrir spectra-suite. Le choix de la fibre à utiliser et de la durée d'acquisition résulte d'un compromis entre luminosité suffisante et non saturation du capteur. Il faut ensuite réaliser un noir (pour soustraire le bruit au signal) puis le plan en ne mettant entre la lampe et la fibre que la cuve de solvant.

## MP n° 12 : Photorécepteurs.

### PLAN :

---

1. Étude d'un photorécepteur, la photodiode
2. Considérations sur les profils spectraux

### BIBLIOGRAPHIE :

---

- Polycopié de TP Montrouge *photorécepteurs*.
- [34] *Optique expérimentale*, Sextant.

### IDÉES À FAIRE PASSER :

---

**Introduction :** Photorécepteur : capteur qui transforme généralement le rayonnement électromagnétique en un signal électrique. ex : oeil limité au domaine spectral du visible et capteur logarithmique. Il existe 2 grandes catégories de détecteur, les thermiques, qui absorbent le rayonnement et induisent une élévation de la température convertie en signal électrique. Et les détecteurs photoniques, qui en absorbant un photon dans un matériau font passer un électron dans un état excité. Étude d'un exemple de chacun de ces détecteurs ainsi que certaines de leurs caractéristiques en commençant par la photodiode qui est un détecteur photonique

## 1 Étude d'un photorécepteur, la photodiode

### Caractéristique courant-tension de la photodiode

On va déjà montrer comment le flux lumineux influe sur la réponse électrique de la photodiode et en fait effectivement un photorécepteur.

Expérience : Tracer la caractéristique courant-tension de la photodiode en mode XY à l'oscillo, éventuellement avec un transformateur d'isolement pour placer la masse là où ça nous arrange. Envoyer une tension sinusoïdale de fréquence 100 Hz dans la photodiode reliée à une résistance, [34], p. 68.

Expérience : Faire varier le flux incident sur la photodiode en changeant la focalisation du condenseur de la QI et observer l'abaissement de la caractéristique. L'intensité de saturation a diminué! [34], p. 68.

On met ainsi en évidence le fait que plus le flux est grand, plus l'intensité sortant de la photodiode sera importante et proportionnelle à la tension à un facteur R près.

Ceci n'est vrai que dans la zone plate de la caractéristique qui correspond à une réponse linéaire de la photodiode donc il faut vérifier la linéarité!

### Réglage et propriétés de la photodiode

Expliquer le principe de la polarisation en inverse.

Expérience : Évaluer le courant inverse obscurité (voltmètre dont on connaît l'impédance d'entrée en série!) [1] p. 64. Comparer à la valeur de la notice 22.

Pour vérifier qu'on a correctement branché la photodiode on vérifie que sa réponse est bien linéaire. Il y a deux protocoles (il faut choisir...) :

Expérience : Soit on éclaire successivement avec deux photodiodes et on vérifie que le signal total est somme des deux signaux. Voir [34], p. 67.

Expérience : On met une QI avec deux polariseurs que l'on croise au fur et à mesure et on vérifie que le signal de la photodiode est cohérent avec la loi de Malus.

### Transition :

---

## 2 Considérations sur les profils spectraux

On voudrait trouver la réponse spectrale de la photodiode (définir et expliquer l'importance de la grandeur) mais le problème c'est qu'on ne connaît pas la puissance envoyée par la lampe à chaque longueur d'onde.

### Instrument à réponse spectrale plate

On admet que le pyromètre optique a une réponse spectrale plate et on en déduit la lampe.

Expérience : Expliquer le fonctionnement du pyromètre, revenir sur l'utilité du hacheur. Ajouter un point à la courbe d'étalonnage. Voir [34], pp. 81-83.

### Profil spectral de la photodiode

Expérience : Ajouter un point sur la courbe de la réponse spectrale de la photodiode (il y a des chances pour qu'il faille refaire toute la réponse spectrale pour 5-6 longueurs d'onde car la photodiode a changé d'alignement) + incertitudes. Voir traitement des courbes dans [34], p. 81-83.

Comparer à la courbe constructeur (Notice 22), notamment le max de sensibilité (850 nm) Constaté que l'on n'obtient la décroissance de la réponse comme dans la notice qu'à la limite du monochromateur à 1000 nm. Pour passer de tension à puissance regarder la sensibilité notice.

**Conclusion :** Récap + détecteur peuvent être assemblés pour former des détecteurs d'image CCD ou panneaux photovoltaïques.

### BONUS :

- Pour les réponses spectrales on peut tenter un truc pas mal : mettre une lame semi réfléchissante pour que le rayon en sortie du monochromateur vienne frapper en même temps le pyromètre et la photodiode comme ça on peut faire directement toute la courbe devant le jury!

## MP n° 13 : Biréfringence, pouvoir rotatoire.

### PLAN :

1. Biréfringence d'une lame épaisse
2. Activité optique induite par champ magnétique

### BIBLIOGRAPHIE :

- [34] Sextant
- Polycopié de TP Montrouge *polarisation II*.

### IDÉES À FAIRE PASSER :

#### Introduction :

Expérience : Présenter le phénomène de biréfringence en projetant l'image d'un diaphragme en sortie d'un matériau biréfringent, faire tourner le matériau : les deux faisceaux ne se superposent pas, il y en a un qui tourne autour de l'autre (voir [34], p. 282). Faire le montage devant le jury?

On peut constater sur l'exemple la présence de 2 images dont l'une est décalée et tourne avec le cristal. Cela caractérise un milieu biréfringent, milieu dans lequel la lumière se propage de manière anisotrope : distinguer les milieux biaxes qui ont 3 indices différents et uniaxes qui ont deux indices identiques dits ordinaires et un dit extraordinaire (celui qui est dévié sur l'expérience). Dans le montage on ne s'intéresse qu'aux milieux uniaxes.

## 1 Biréfringence d'une lame épaisse

L'objectif est de remonter à la différence d'indice d'un quartz constituant une lame épaisse. On réalise un montage permettant d'observer l'effet d'une lame épaisse de Quartz parallèle sur la lumière. Après un passage de la lumière dans cette lame, les deux rayons subissent une différence de marche quantifiée par le déphasage  $\delta\phi = 2\pi\Delta n e$  où  $\Delta n$  est la différence d'indice du matériau appelée biréfringence.

Expérience : Éclairer la fente en lumière blanche et former son image sur écran. Intercaler polariseur et analyseur croisés et placer la lame à analyser, chercher les lignes neutres en la tournant de manière à rétablir l'extinction, puis l'orienter de sorte que les lignes neutres soient à 45° de la direction du polariseur, ce qui correspond à l'éclairement maximal. Observé en sortie d'un PVD le spectre cannelé. L'écart en longueur d'onde entre les cannelures permet de remonter à  $n$ . On fait la mesure grâce au spectrophotomètre USB relié à SpectraSuit (faire le noir) et on récupère le relevé Scope minus dark sur Qtiplot. Voir [34], p. 290 : avec  $e$  l'épaisseur de la lame,  $\Delta p$  le nombre de franges entre  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  on a

$$e\Delta n = \frac{\Delta p \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$$

Remarque : L'indice dépend de la longueur d'onde. On peut donc faire la mesure de biréfringence en différents endroits du spectre.

**Transition :** Il existe un autre phénomène lié à la lumière polarisée qui se distingue de la biréfringence : le pouvoir rotatoire (polarisation tournante, donner la définition).

## 2 Activité optique induite par champ magnétique

Voir [34], p. 320 - La propagation de la lumière dans un milieu peut être affectée lorsque celui-ci est soumis à un fort champ magnétique longitudinal. C'est l'effet Faraday. L'effet étant relativement faible, il est nécessaire que le champ magnétique soit élevé (de 0.1 à 1 T). Il est donc préférable d'utiliser un électroaimant dont les pièces polaires coniques sont percées pour laisser passer le faisceau laser. Une onde polarisée rectilignement garde cette polarisation à la traversée du milieu, mais sa direction de polarisation tourne d'un angle dont l'expression est donnée par la relation empirique  $\beta = Vbd$ .

Expérience : On utilise un Flint. Mettre en évidence la rotation de la direction de polarisation d'un angle  $\beta$ . Détermination de la constante de Verdet. Éventuellement montrer l'influence du changement de sens du champ magnétique sur l'angle  $\beta$  et ajustement de l'angle de la polarisation en fonction du champ magnétique imposé.

**Conclusion :** Mise en évidence de 2 phénomènes. Biréfringence : matériaux dont les propriétés permettent de créer des lames spécifiques afin d'influencer la polarisation et de pouvoir la modifier de manière contrôlée (demi onde, quart d'onde) et le pouvoir rotatoire que l'on retrouve en particulier en chimie avec l'étude des molécules chirales.

# MP n° 14 : Polarisation des ondes électromagnétiques.

## PLAN :

1. Caractère vectoriel des ondes électromagnétique
2. Production d'une onde polarisée rectilignement
3. Analyse d'une lumière polarisée elliptiquement

## BIBLIOGRAPHIE :

- [34] Sextant, *Optique expérimentale*.
- Polycopié de TP Montrouge, *polarisation I et II*.
- Pour la théorie on peut relire le TD de C. Sayrin.

## IDÉES À FAIRE PASSER :

La lumière est en générale non polarisée, mais elle peut acquérir, sous différents effets, une polarisation typiquement elliptique. Il s'agit ici de comprendre comment analyser la polarisation des ondes électromagnétiques.

**Introduction :** La propagation des ondes électromagnétique est due à un couplage entre les champs E et B. La polarisation d'une telle onde traduit l'orientation du champ ÉLECTRIQUE. Présentation du plan : confirmer l'aspect vectoriel du champ, puis domaine optique parce que ça à l'avantage qu'on a pas forcément besoin d'un attirail de capteurs pour voir ce qui se passe : on a nos yeux!

## 1 Caractère vectoriel des ondes électromagnétique

Loi de Malus sur le banc hyperfréquence avec la grille centimétrique. Explication du montage : la grille laisse passer la polarisation orthogonale (à expliquer en terme de courants de Foucault dans le métal, et détailler l'influence du pas de la grille).

**Expérience :** Montrer qualitativement que la rotation de la grille influe sur l'amplitude de l'onde au niveau du récepteur et vérifier la loi de Malus pour les ondes centimétriques. Pour rendre l'expérience quantitative, utiliser un rapporteur rotatif sur socle : fixer le polariseur à grille dessus, prendre une dizaine de points pour des orientations différentes, et tracer le coefficient de transmission en fonction de l'angle de rotation.

Attention à bien ajuster en  $U^2 = A \times [\cos(\theta - \theta_0) + B]^2$  et interpréter correctement les différents offsets.

**Transition :** On étudie souvent les phénomènes optiques dans l'approximation du modèle scalaire. Quels phénomènes apparaissent si on sort de ce modèle et que l'on tient compte du caractère vectoriel de la lumière?

## 2 Production d'une onde polarisée rectilignement

Le moyen classique c'est d'utiliser un polariseur :

**Expérience :** On travaille en sortie d'une Philora avec diaphragme, entre deux lentilles en configuration Fraunhofer. Expliquer le fonctionnement du polariseur, puis le principe de l'analyseur, et vérifier que ça marche.

On peut aussi obtenir naturellement une polarisation de la lumière par réflexion vitreuse sur un diélectrique à l'angle de Brewster.

**Expérience :** Miroir de diélectrique, réflexion parasite absorbée par la couche noire derrière lui. On règle d'abord le dispositif pour être en incidence normale pour ensuite bien étudier l'angle. Pour Brewster on aura une direction de polarisation orthogonale au plan d'incidence donc si on envoie de la lumière polarisée dans le plan d'incidence on cherche en fait l'angle d'extinction. L'extinction n'est pas vraiment totale par défaut du polariseur. Comparer à la valeur théorique de l'ordre de  $56^\circ$  ( $\arctan(n_1/n_2)$ ).

**Transition :** C'est un cas très particulier de polarisation. Dans le cas général une onde lumineuse n'est pas polarisée et, si elle l'est, elle est polarisée elliptiquement.

### 3 Analyse d'une lumière polarisée elliptiquement

Voir [34], P. 299 - Définition du taux d'ellipticité.

Expérience : Obtention d'une polarisation elliptique par réflexion d'un laser polarisé rectilignement sur un miroir métallique. Interprétation :

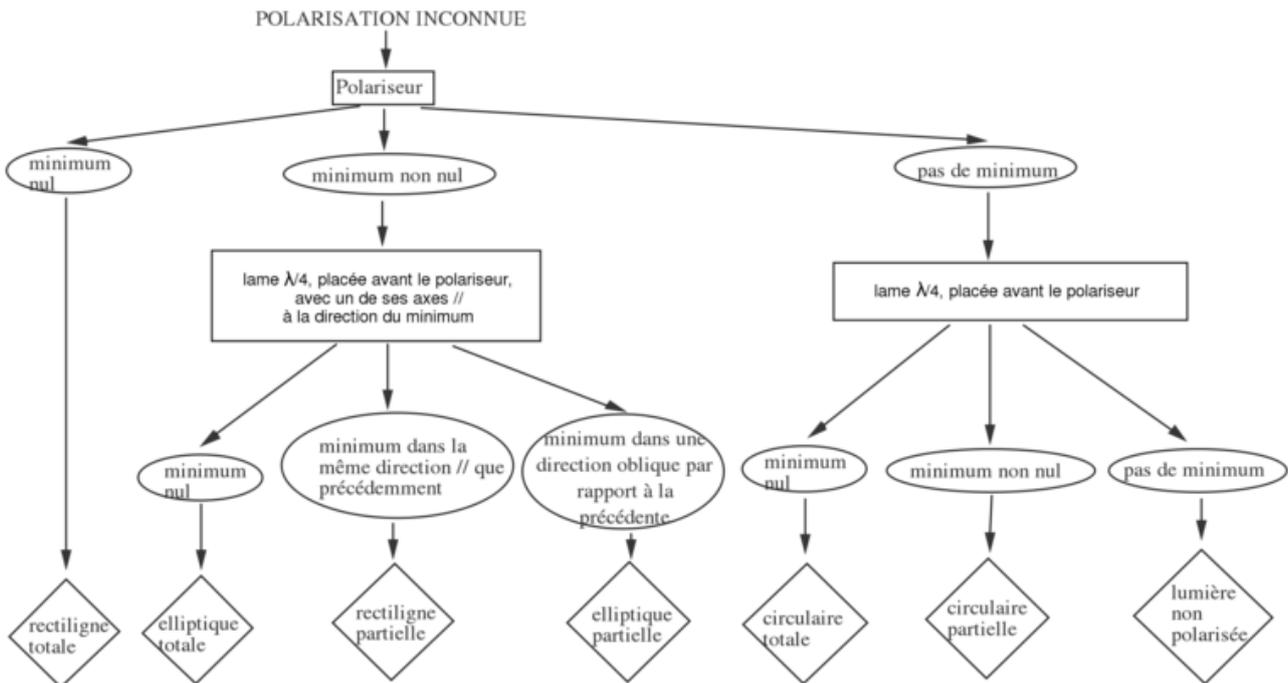
- A la  $\lambda/4$  : le taux d'ellipticité se ramène au  $\tan(\beta)$  où  $\beta$  est la différence entre l'angle de l'analyseur pour avoir un minimum d'intensité en sortie et l'angle de la  $\lambda/4$  pour avoir extinction. Mesure et estimation de l'incertitude. Voir [34], p. 300-302.
- A l'oscillo : On place un polariseur tournant en sortie et une photodiode dont le signal est envoyé à l'oscillo. Le taux d'ellipticité vaut  $\tan(\beta) = \sqrt{V_{min}/V_{max}}$ . Mesure et estimation de l'incertitude.

Il serait de bon goût que les deux mesures coïncident aux barres d'erreur près!

**Conclusion :** On peut se servir de la polarisation des ondes lumineuses pour créer de nouveaux phénomènes : éteindre les réflexions parasites de la lumière (lunettes polarisées), lunettes 3D (une direction par oeil à la base, maintenant plutôt circulaire pour que ça dépende moins de la position de la tête etc...)

**BONUS :**

1. Protocole d'analyse d'une lumière polarisée :



# MP n° 15 : Production et mesure de champs magnétiques.

**PLAN :** \_\_\_\_\_

1. Production de champs magnétiques
2. Mesure du champ magnétique terrestre

**BIBLIOGRAPHIE :** \_\_\_\_\_

- Polycopié de TP Montrouge *magnétisme*.
- [5] BFR *Électromagnétisme 4* - pour la théorie
- [7] Berty, Fagot, Martin, *Électricité pratique 1*.
- [18] Fleury-Mathieu, *Électrostatique, courants continus, magnétisme*.
- [25] *Supermanuel de physique*, S. Komilikis.

**IDÉES À FAIRE PASSER :** \_\_\_\_\_

Il existe une grande dynamique de champs magnétiques. On a souvent intérêt à produire des champs les plus intenses et uniformes possibles. Comment mesurer les champ naturellement à notre disposition (surtout les faibles)?

**Introduction :** Il existe une grande dynamique de champs magnétiques  $\vec{B}$  différents : de  $10^{-5}$  T pour le champ magnétique terrestre à quelques teslas dans un IRM à champ fort, voire quelques centaines de teslas en champ pulsé. Pour mesurer des champs magnétiques on peut citer différentes méthodes : la balance de Cotton (mesure absolue), l'effet Hall, le fluxmètre, la magnétorésistance, le SQUID, ... (à ne pas prononcer si on n'a pas le temps de regarder comment tout ça fonctionne!) Dans ce montage, on va se servir de sondes à effet Hall pour réaliser les mesures. On peut en expliquer brièvement le principe avant de continuer, notamment le fait qu'on a deux types de sonde à notre disposition pour les mesures de champs tangentiels ou normaux.

## 1 Production de champs magnétiques

### 1.1 Bobines de Helmholtz

C'est un moyen de produire un champ magnétique au choix uniforme ou à très fort gradient (selon l'alimentation) entre les deux bobines alimentées par une alimentation de courant 5 A. C'est ce qu'on illustre.

**Expérience :** Tracer la valeur du champ magnétique selon  $O_z$  en fonction de la distance le long de l'axe de la/des bobine/s dans trois cas différents - Il faut utiliser la table traçante pour translater proprement la sonde le long de l'axe :

- Une unique bobine alimentée pour avoir la forme générale du champ magnétique (on peut d'ailleurs ajuster facilement normalement et c'est un moyen de vérifier que la sonde est bien sur l'axe!)
- Deux bobines en alimentation helmholtz pour différentes distances;
- Deux bobines en alimentation anti-helmholtz pour différentes distances.

On fait un relevé à la table traçante devant le jury dans une des configuration.

Discuter de la forme de la courbe dans ces trois cas. Le champ est maximal (valeur) et homogène (à quantifier) quand  $R = D$  et que le courant circule dans le même sens (production de champ homogène) mais si on fait circuler le courant dans les sens opposés on obtient un champ à fort gradient. On peut tenter un ajustement, voir formule dans le supermanuel de physique [25].

Note sur l'utilisation de la table traçante : il faut être en mode A pour que la table soit contrôlée par la tension envoyée à ses bornes (en X). Lorsque la tension est à 0 la table est à son zéro, et elle doit avoir à peu près 25 mV d'amplitude... A retester le jour J! On règle la vitesse de balayage en réglant la période du signal. Le teslamètre est relié à un voltmètre relié à interface V9. Il faut aller vraiment doucement pour que tout cela ait le temps de prendre correctement les points! Il faut enfiler une tige à trou dans l'armature de la table traçante et la sonde longitudinale dans la tige à trou.

### 1.2 Electroaimant

C'est un exemple de circuit magnétique ouvert. Discuter du fonctionnement, du choix des pièces (les tronconiques permettent d'atteindre les champs les plus grands, les cylindriques permettent un grand domaine de champ

uniforme). Expliquer d'où vient la formule :

$$\frac{\mu_0 n I}{\frac{L}{\mu_r S} + e}$$

**Expérience :** On travaille à  $e$  fixé (l'estimer + incertitude) et on fait varier  $I$ . On mesure  $B$  au centre de l'entrefer avec une sonde à effet Hall maintenue fixe du mieux possible.

On doit obtenir une droite (car  $L \approx 1,4$  m,  $s/S = 1/4$  et  $\mu_r \approx 1000$ ). Le vérifier et évaluer la pente qui doit permettre de retrouver le bon nombre de spires (5600 spires parcourues par  $I$ , ou en fait, dans notre cas, 11200 spires parcourues par un courant  $I/2$  car elles sont branchées en parallèle. La saturation est probablement due à la saturation de  $\mu_r$  lorsque  $B$  devient trop grand (voir LP sur le ferromagnétisme).

**Transition :** Dans ces cas où le champ magnétique est de l'ordre du mT, on s'est servi d'une sonde à effet Hall pour le mesurer. Les champs plus faibles sont souvent mesurés par comparaison avec d'autre champ connus, c'est ce qu'on illustre sur la boussole des tangentes.

## 2 Mesure du champ magnétique terrestre

La terre engendre dans l'espace qui l'entoure un champ magnétique de l'ordre de la dizaine de microteslas. L'objectif est de mesurer l'intensité de sa composante tangente à la surface de la terre. Voir pour cette manip' [7], p. 263 et [2], p. 68 (pour la manip en tant que telle) et 266 (pour le champ d'une spire).

**Expérience :** Il faut commencer par s'assurer qu'on ne produit pas de champ parasite dans la salle au moment où on fait la mesure! On peut aussi vérifier, à l'aide d'une autre boussole, que la boussole des tangentes indique bien le nord magnétique de la terre. Il faut alors aligner la boussole au zéro du compas. On alimente alors la spire de plus petit rayon (pour avoir un champ plus intense) par un courant continu, mesuré par un ampèremètre, inférieur à 5 A. On mesure l'angle de déviation  $\alpha$  pour différentes valeurs d'intensité.

On approxime le champ magnétique auquel est soumis l'aiguille au champ au centre de la spire (car on ne connaît que celui-là) :  $B = \frac{\mu_0 I}{2R}$ . L'angle pris par la bobine résulte alors de l'équilibre entre ce champ et le champ magnétique terrestre de sorte que

$$\tan(\alpha) = \frac{B}{B_{terre}}$$

on peut enfin remonter à  $B_{terre}$ . L'incertitude dominante est celle sur  $\alpha$  car dès que le couple est inférieur au frottement l'aiguille s'arrête sans avoir atteint sa position finale théorique, + une erreur de lecture. On peut limiter l'influence de la première en déstabilisant l'aiguille entre chaque mesure, et en faisant la moyenne entre l'angle  $\alpha(I)$  et l'angle  $\alpha(-I)$  (la chose est rendue plus simple en utilisant un interrupteur inverseur, cf. [2]). La valeur théorique est de l'ordre de 20  $\mu$ T. Cette méthode sert aussi aux magnétomètres à aimant mobile, voir [2], p. 72.

**Conclusion :** Les phénomènes à l'origine de la production du champ magnétique terrestre sont encore assez méconnus, mais elle assimilable à un moment magnétique assez fort (voir [25]).

**BONUS :**

- Il faut se renseigner sur la production de champs magnétiques très forts.
- On peut relire utilement les leçons associées!

## MP n° 16 : Milieux magnétiques.

**PLAN :** \_\_\_\_\_

1. Milieux paramagnétiques
2. Milieux ferromagnétiques
3. Transition ferro/para

**BIBLIOGRAPHIE :** \_\_\_\_\_

- [3] & [2] *Quaranta II et IV*
- Polycopié de TP Montrouge *magnétisme*.
- [5] BFR *électromagnétisme 4* - pour la théorie
- [18] Fleury-Mathieu, *Électrostatique, courants continus, magnétisme*.

**IDÉES À FAIRE PASSER :** \_\_\_\_\_

Il existe divers types de milieux magnétiques dont les deux principaux sont les ferromagnétiques et les paramagnétiques. Ils ont chacun des utilisations différentes du fait de leur propriétés particulières.

**Introduction :** Les milieux magnétiques nous entourent : aimants du frigo, dans le téléphone, dans les disques durs... Il existe plusieurs sortes de milieux magnétiques, qui ont des propriétés différentes, auxquelles on va s'intéresser.

Expérience (manip introductive) : on place différents milieux magnétiques dans l'entrefer d'un électroaimant et on observe leur réaction :

- Le diamagnétique se place perpendiculairement au champ ;
- Le paramagnétique et le ferromagnétique s'alignent avec le champ.

On donne des ordres de grandeurs des susceptibilités magnétiques, permettant de caractériser ces différentes classes de milieux magnétiques (voir [2] aux différentes entrées).

### 1 Réponse d'un milieu paramagnétique

Mesure de la susceptibilité de  $\text{FeCl}_3$  - voir [2], p.341 et [5], chapitre 6.

Expérience : Mettre la solution dans l'entrefer de l'électroaimant. Commenter le choix des pièces tronconiques (champ plus intense) et mesurer la hauteur de montée du liquide par projection (Lampe ENSP2751) de l'autre côté du tube en fonction du champ magnétique appliqué. Selon le temps, on peut faire la montée et la descente du liquide car l'évolution du ménisque peut présenter un phénomène d'hystérésis qu'on peut alors moyenner.

Tracer  $h$  en fonction de  $B^2$  :

$$\chi \frac{B^2}{2\mu_0} = \rho g 2\Delta h$$

et remonter à  $\chi$  avec la pente. La susceptibilité magnétique  $\chi = M/H$  est tabulée pour le  $\text{FeCl}_3$  solide ( $\chi_{\text{FeCl}_3} = 3000 \times 10^{-6}$ ) et on passe à celle de la solution par extensivité :

$$\frac{\chi_{\text{solide}}}{\chi_{\text{solution}}} = \frac{\rho_{\text{solide}}}{\rho_{\text{solution}} r}$$

avec  $r$  le pourcentage en masse de  $\text{FeCl}_3$  dans la solution. On trouve une valeur tabulée dans le Fleury-Mathieu [18] de  $\chi_{\text{FeCl}_3} = 3 \times 10^{-6}$ .

**Transition :** Les milieux paramagnétiques n'ont pas d'aimantation à champ nul ce qui ne permet pas de les utiliser pour les applications industrielles courantes (moteur, disques durs, ...). On leur préfère donc les milieux ferromagnétiques durs ou doux qui garde une aimantation non nulle à champ nul.

## 2 Réponse d'un milieu ferromagnétique

Voir photocopié de TP montrant *Conversion de puissance électrique* - Cycle d'hystérésis du fer doux et de la ferrite, in [2], p. 491. Eventuellement remplacer le circuit intégrateur avec AO par un RC puis mesurer  $H_c$ ,  $B_{rem}$  et  $B_{sat}$  et les comparer aux ordres de grandeurs des ferro durs/doux. Pour la théorie, on peut voir [15], p. 92.

---

**Transition :** En fait le caractère ferromagnétique des corps résulte d'une compétition entre l'énergie d'agitation thermique et l'interaction d'échange favorable à cette dernière. En augmentant la température on peut inverser le rapport de force et le corps devient paramagnétique.

---

## 3 Transition ferro-para

Voir montage transitions de phases - MP06.

---

**Conclusion :** On a observé les propriétés des différents milieux magnétiques. C'est utile pour leur application - exemple du disque dur : le matériau sur lequel on écrit est ferromagnétique dur (pour ne pas que les données soient altérées au passage du moindre aimant) mais la tête de lecture est en ferromagnétique doux ou en paramagnétique.

## MP n° 17 : Métaux.

### PLAN :

---

1. Propriétés mécaniques des métaux
2. Propriétés électriques des métaux
3. Propriétés thermiques des métaux

### BIBLIOGRAPHIE :

---

- [23] Kittel, *Physique de l'état solide*.
- [19] *Physique expérimentale*, E. Thibierge et coll.

### IDÉES À FAIRE PASSER :

---

Lorsqu'on regarde et touche un métal, un certains nombres de propriétés apparaissent communes à tous. Ce sont elles que nous allons mesurer dans ce montage.

---

**Introduction :** Définir proprement un métal : bandes de conduction, de valence etc... MENTIONNER LA DÉLOCALISATION DES ÉLECTRONS! Idéalement il faut avoir plusieurs métaux disponibles à montrer au jury pour mettre en évidence leurs points communs (voir par exemple la manip Igenhousz, ENSP4123) : aspect brillant, solidité, toucher froid. L'idée de ce montage est d'expliquer les propriétés les plus communes des métaux, et de le faire sur un certain nombre de métaux différents.

## 1 Propriétés mécaniques des métaux

La première observation que l'on peut faire, et c'est la principale raison de leur utilisation, c'est que les métaux sont « solides » ou d'un point de vue plus physique : ils ont un module d'Young important. On va quantifier cela en mesurant le module d'Young de l'acier - C'est un alliage de fer et de 0,02% à 2% de carbone.

Expérience (Elastica) : Évaluer la masse critique grossièrement, puis mesurer la période d'oscillation pour différentes masses inférieures à  $m_c$ . C'est l'ajustement de ces relevés qui donne accès à la masse critique précise. Celle-ci permet finalement de remonter au module d'Young de l'acier. On doit trouver une valeur de l'ordre de  $E = 210 - 220$  GPa.

Sur **slide**, on présente les modules d'Young de quelques matériaux. Parmi les éléments simples, les métaux ont un très fort module comparés aux autres. Certains matériaux courants ont aussi un très fort module, mais c'est ceux pour lequel c'est justement le but recherché (alliages, email, fibre de carbone...).

Le métaux sont en vrai très résistants en déformation longitudinale, mais il sont ductile et plient facilement (sans rompre). C'est pour ça que dans le BTP on utilise du béton armé : le métal assure la solidité verticale et le béton empêche le flambage.

---

**Transition :** L'autre utilisation commune des métaux, c'est les fils électriques car ce sont de très bons conducteurs (montrer les valeurs de conductivités électriques sur **slide**. En revanche ils ont un défaut important : leur résistivité augmente avec la température (problème dans les ordinateurs, téléphones etc qu'il faut sans cesse refroidir). On illustre cette propriété sur une sonde de platine.

---

## 2 Propriétés électriques des métaux

La conductivité électrique décroît avec la température du fait de l'augmentation de l'agitation thermique.

Expérience (Influence de T sur la résistance de Pt) : Mesurer  $R(T)$  pour une large plage de température (de 0°C à 100°C). Ajuster par la formule de la notice associée ( $R(t) = R_0 \times (1 + At + Bt^2)$  avec  $A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{°C}^{-1}$  et  $B = -5,7750 \times 10^{-7} \text{°C}^{-2}$ ) et comparer.

L'ajustement est un peu sioux : a priori la bonne manière de faire c'est de récupérer le coefficient d'ordre supérieur dans la notice, le fixer lors de l'ajustement, et vérifier qu'on a le bon coefficient pour l'ordre dominant. On ne peut pas prétendre obtenir tous les coefficients de manière fiable avec aussi peu de points.

Noter un point positif : ça sert en thermométrie pour mesurer  $R$  (assez facile...) et remonter à  $T$  ! Faire le lien entre cette propriété de bonne conduction électrique et l'aspect optique évoqué en introduction...

**Transition** : Le dernier aspect qu'on remarque en étudiant un métal, c'est une propriété thermique : ils paraissent froids au toucher. Cela suppose que le contact thermique entre nos doigts et le matériaux est particulièrement efficace, donc que les métaux auraient une grande diffusivité thermique.

### 3 Propriétés thermiques des métaux

Expérience (Conductivité thermique du barreau de cuivre) : On impose une puissance d'un côté, et une température de l'autre. On attend que le RP soit établi (le temps à attendre peut être estimé, il vaut  $\tau \approx L^2/D$ ). On estime la conductivité thermique en appliquant la formule

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

Remarque : Dans cette manip, on peut suivre le régime transitoire. Ca n'a peut être pas un intérêt fou ici... Voir la méthode d'analyse dans [19].

**Conclusion** : On a donc bien mis en évidence les propriétés que nous avons constaté en introduction!

**BONUS** :

1. Voir Kittel pour les propriétés optiques des métaux?
2. Attention à soigner les transitions sans trop broder pour ne pas ensuite avoir des questions tordues sur ce qu'on aura pu affirmer... Être au clair sur la définition d'un métal (cf. <https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9talpage> Wikipédia).

# MP n° 18 : Matériaux semi-conducteurs.

## PLAN : \_\_\_\_\_

1. Énergie de gap d'un semi-conducteur intrinsèque
2. Densité de porteurs de charges d'un semi-conducteur extrinsèque
3. Photo-sensibilité d'un semi-conducteur

## BIBLIOGRAPHIE : \_\_\_\_\_

- [1] *Capteurs en instrumentation industrielle*, Asch.
- [4] & [2], Quaranta III et IV.
- [17] R. Duffait, Tome d'électricité.
- [34] Sextant, *Optique expérimentale*.

## IDÉES À FAIRE PASSER : \_\_\_\_\_

Il faut ici retrouver expérimentalement les propriétés qui définissent un semi conducteur par rapport à un conducteur usuel : énergie de gap, densité de porteur, création de photo-électrons sous l'effet du rayonnement électromagnétique.

**Introduction :** Définir proprement un semi conducteur par la théorie des bandes. Rappeler brièvement les définitions et l'origine des trois propriétés que l'on va mesurer dans ce montage. L'idée est de mettre expérimentalement en évidence les propriétés justifiant de l'intérêt des semi-conducteurs.

## 1 Énergie de gap d'un semi-conducteur intrinsèque

On étudie l'évolution de la résistance d'un échantillon de germanium intrinsèque ENSP4090 en fonction de la température. L'échantillon est accolé à une résistance chauffante (sous maximum  $U = 6\text{ V}$  et  $I = 5\text{ A}$ ), et la température est donnée par un thermocouple (de sensibilité  $40\text{ }\mu\text{V/K}$ ) - On ne dépasse pas  $150\text{ }^\circ\text{C}$ . La variation de  $R$  est mesurée au ohmmètre, et la notice donne l'expression de  $\ln(R) = f(1/T)$  en fonction de l'énergie de gap ([17], p.110 et [2], p.543)

Expérience : La notice donne  $\sigma = \sigma_0 \exp(\frac{E_g}{2k_B T})$  et cette formule est d'autant meilleure que  $T$  est faible. On fait le relevé en préparation, on rajoute quelques point devant le jury et l'analyse des résultats. Apporter un soin particulier aux incertitudes. Il faut probablement introduire un offset de température (dû à la géométrie de la plaquette?) pour que ça ajuste bien par une droite.

**Transition :** La plupart des semi-conducteurs ne sont en fait pas intrinsèques mais sont dopés. On va mesurer leur densité de porteurs de charges.

## 2 Densité de porteurs de charges dans un semi-conducteur extrinsèque

Expérience (Signe des porteurs de charge) : On peut déjà s'assurer qualitativement que  $V_H < 0\text{ V}$  donc  $q < 0\text{ C}$ , et changer d'échantillon (passer de N à P) pour constater que la tension hall change effectivement de signe. [4]

L'évolution de la tension Hall en fonction du champ magnétique appliqué peut nous renseigner sur la densité de porteurs de charge. On commence par mesurer la résistivité à  $T$  ambiante et la comparer à la valeur fabricant. On place ensuite le SC sous l'influence du champ magnétique d'un électroaimant.

Expérience (Densité de porteur d'un semi-conducteur extrinsèque) : A condition qu'il n'y ait qu'un seul type de porteur dans l'échantillon, la tension Hall dans le SC est donnée par

$$V_H = \frac{IB}{bnq}$$

Annuler d'abord la chute ohmique (due au non alignement des points C et D) grâce au potentiomètre de compensation. Place le SC dans l'entrefer d'un électroaimant [l'entrefer plat donne un champ uniforme, mais l'entrefer conique donne un champ plus intense], mesurer  $B$ ,  $V_C$  et  $V_D$ . Calculer  $V_H$  pour plusieurs valeurs de  $B$  et ajuster.

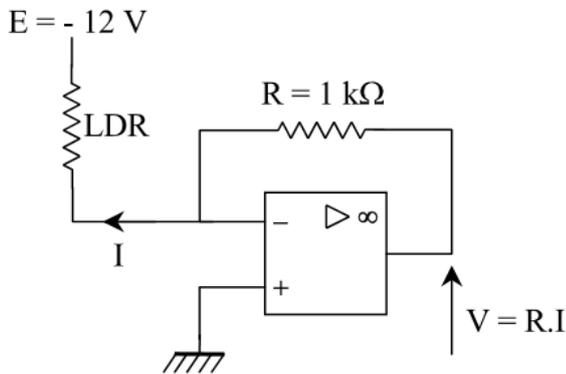
Remarque : c'est le principe du teslamètre!

**Transition :** L'énergie de gap est choisie de telle sorte qu'elle peut coïncider avec l'énergie du rayonnement optique. Les propriétés électriques des SC peuvent donc interagir avec ses propriétés optiques.

### 3 Photo-sensibilité d'un semi-conducteur

Expérience (Énergie de gap - A ne pas faire, sauf catastrophe...) : Un cristal semi-conducteur est transparent pour  $hc/\lambda \ll E_{gap}$  mais devient opaque pour  $hc/\lambda \gg E_{gap}$ . Pour une telle énergie, le photon permet d'exciter un électron de la bande de valence vers la bande de conduction : il est absorbé. On peut faire cette manip en plaçant l'échantillon entre un ensemble illuminateur/monochromateur, et un écran. Les limites du visible correspondent à des gap de 1,6 eV (rouge) et 3,1 eV (bleu), on peut alors situer l'énergie des gap de GaAs et GaP par rapport à ces bornes.

On peut s'intéresser quantitativement à la création de porteurs sous effet d'un rayonnement lumineux dans une photo-résistance/cellule photoconductrice au CdS : l'absorption des photons d'énergie supérieure au gap génère des paires électron-trou. Pour l'expérience, on utilise le montage à AO suivant :



La variation de résistance des cellules photoconductrices est importante : de quelques  $M\Omega$  pour la résistance d'obscurité à quelques centaines de  $\Omega$  à éclairage usuel. Le montage ci-contre permet de maintenir constant le potentiel aux bornes de la cellule, et le courant  $i$  qui traverse  $R$  est proportionnel à la résistance de la cellule. La seule limitation ici est la saturation de l'AO.

On étudie la réponse de la cellule à un flux lumineux : elle est éclairée au stroboscope à basse fréquence (10 Hz) à distance suffisante pour ne pas saturer l'AO, et on observe le signal électrique. La création de porteur est quasi immédiate, mais la recombinaison des paires se fait sur une durée de vie de l'ordre de 10 ms (voir [34], p. 70 ou Asch, p.156).

Expérience (Photoconductivité) : Mesure du temps de réponse de la cellule photoconductrice. Selon le temps on peut mettre en évidence la non linéarité du composant (voir [34], p.72).

**Conclusion :** Ce sont enfin ces propriétés qu'il s'agit d'exploiter, par exemple dans les cellules photovoltaïques!

**BONUS :**

- Il peut être intéressant de lire l'onglet « semi-conducteurs » du Quaranta III [4] pour se préparer aux questions.
- Il faut absolument avoir en tête les ordres de grandeurs des énergies de gap des semi-conducteurs usuels : voir [23], chapitre 8, tableau 1.

## MP n° 19 : Effets capacitifs.

### PLAN :

1. Modèle expérimental de condensateur, le condensateur d'Aepinus
2. Effets capacitifs parasites dans une bobine
3. Utilisation d'un condensateur cylindrique

### BIBLIOGRAPHIE :

- Polycopié de TP Montrouge *Capteurs de grandeurs mécaniques*
- [4] Quaranta et [17] R. Duffait, tomes d'électricité.
- [5] Bertin-Faroux-Renault, *Électromagnétisme 4*.
- [14] *Gouttes, Bulles, Perles et Ondes*, P.-G. de Gennes et coll.
- BUP 768 sur *Les circuits électriques utilisant certains éléments constitués par des câbles coaxiaux*.
- Sur les mesures de capacité et inductance linéiques, voir document de C. Sayrin.

### IDÉES À FAIRE PASSER :

On présente les effets capacitifs sur un modèle simple pour étudier la dépendance de ces effets avec la distance, le diélectrique, etc... Puis on présente successivement deux types d'effet, l'un négatif dans une bobine à haute fréquence et l'autre positif en se servant des effets capacitifs pour concevoir un capteur de hauteur d'eau.

**Introduction :** Les effets capacitifs sont souvent utilisés pour leur propriété primaire  $i = C du_c / dt$ , ce que l'on va essayer de comprendre dans un premier temps. Ces effets peuvent aussi apparaître de manière inopportune dans les circuits lorsque la fréquence devient trop élevée. On peut enfin mettre ces effets, a priori parasites, à profit pour faire une mesure de profondeur.

## 1 Modèle expérimental de condensateur, le condensateur d'Aepinus (N168)

Les effets capacitifs apparaissent dans un circuit lorsque des charges s'accumulent sur des surfaces opposées.

**Expérience :** Mesure de la capacité au RLC mètre pour différents espacements des armatures en prenant en compte l'incertitude sur la distance (mesure au vernier, comparer à une mesure au pied à coulisse numérique pour voir si le vernier est OK!). On ajuste les relevés par une droite donnée dans la notice.

On peut comparer la valeur de la pente à la valeur théorique donnée par la notice. L'écart à cette valeur s'explique notamment par les effets de bords dont l'importance est plus ou moins grande selon la distance, et différentes capacités parasites dans le montage. De plus, la formule appliquée est vraie en électrostatique et le RLCmètre travaille en sinusoïdal.

**Expérience :** Regarder qualitativement l'influence du diélectrique sur la capacité du condensateur. Voir [5] pour la théorie. On peut prendre un peu de temps pour comparer les effets observés au comportement prévu par la formule usuel de capacité :  $\epsilon_0 \epsilon_r S / e$ .

**Transition :** Les effets capacitifs sont malheureusement surtout célèbres pour intervenir souvent de manière inopportune dans certains dispositifs électriques. On présente un tel cas ci-après.

## 2 Effets capacitifs parasites dans une bobine

De tels effets apparaissent à haute fréquence lorsque les charges s'accumulent entre les spires de la bobine et créent ainsi des mini-condensateurs. En fait, à haute fréquence, la bobine est équivalente à un circuit R, L, C parallèle. Son impédance équivalente est :

$$Z_{eq} = \frac{jL\omega}{1 + \frac{j\omega}{Q\omega_0} - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad \text{où} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{et} \quad Q = r\sqrt{\frac{C}{L}}$$

Expérience : On peut relever les tensions aux bornes de la résistance et du GBF puis faire des opérations sous python pour tracer  $Z_{eq}$  en fonction de  $\omega$  et on trouve le maximum!

On peut commencer par faire le diagramme de Bode général de la bobine sur une large bande en fréquence, mais on va manquer de points autour de la résonance donc pour affiner la mesure on peut en reprendre ensuite beaucoup autour de la résonance. Il n'y a pas vraiment de valeur tabulée mais on attend un ordre de grandeur de l'ordre de  $C_b \approx 100$  pF.

**Transition :** On peut aussi mettre à profit ces effets en faisant dépendre la capacité d'une grandeur que l'on cherche à mesurer. On peut alors concevoir un capteur par effets capacitifs!

### 3 Utilisation d'un condensateur cylindrique (N197)

On présente ici un capteur de hauteur d'eau, dont la capacité dépend de l'enfoncement du capteur dans l'eau. On peut discuter de sa gamme, de sa linéarité, de sa finesse, etc...

Expérience : On remplit une grande éprouvette d'eau permutée/distillée. Celle-ci est posée sur un boy de sorte qu'on peut en régler facilement la hauteur. On accroche le condensateur cylindrique au dessus et on mesure au RLCmètre, à 100 Hz (pour considérer l'eau comme une résistance pure et négliger sa propre capacité), la capacité dudit condensateur pour différentes hauteurs d'eau. On ajuste enfin les valeurs (avec une ordonnée à l'origine non nulle du fait qu'on ne sait ni exactement quelle est la capacité à vide, et on a pas vraiment de repère clair à partir duquel mesurer la hauteur d'eau). Prendre soin de prendre les mesures en plongeant petit à petit le capteur dans l'eau et non l'inverse. Sécher le capteur avant de prendre une nouvelle série de point. Il se peut qu'on ait à reprendre tous les points devant le jury.

Remarque : Voir le MP04 pour la partie « capteur » de cette manip.

**Conclusion :** Les effets capacitifs, désirables ou non, sont présents dans de nombreux phénomènes physiques. Ils servent aujourd'hui dans les écrans tactiles!

**BONUS :**

- On peut aussi exploiter la propagation dans le câble coaxial mais la mesure n'est pas plus quantitative que pour la bobine...

## MP n° 20 : Induction, auto-induction.

### PLAN :

---

1. Loi de l'induction
2. Étude d'un phénomène d'induction : couplage de deux circuits
3. Caractérisation de la fem d'auto-induction

### BIBLIOGRAPHIE :

---

- [2] *Quaranta IV*, aux entrées induction, auto-induction, couplage.
- [25] *Supermanuel de physique*. J. Majou & S. Komilikis.

### IDÉES À FAIRE PASSER :

---

Caractériser les lois de l'induction. Montrer qu'en plus du phénomène d'induction communément étudié il existe un autre phénomène d'induction d'un circuit dans lui-même : l'auto-induction.

**Introduction :** Les phénomènes d'induction sont décrits par la loi de Lenz-Faraday; ils sont liés à la variation du flux du champ magnétique : dans un circuit toute variation de flux  $d\Phi$  pendant une durée  $dt$  entraîne l'apparition d'une fem  $e = -d\Phi/dt$ . Le circuit subissant cet effet est appelé l'induit, le champ magnétique provoquant cet effet est dit inducteur. On distingue 2 types de phénomène d'induction :

- Le champ inducteur est statique, il y a un déplacement de l'induit par rapport à l'inducteur : induction de Lorentz
- Le champ inducteur dépend du temps  $B=f(t)$  : induction de Neumann

## 1 Loi de l'induction

**Expérience :** Regarder l'influence, du mieux possible, de plusieurs paramètres : vitesse de mouvement de l'aimant par rapport à la bobine (notamment, pas de courant si l'aimant est immobile, même s'il est complètement dans la bobine), force de l'aimant, choix de la bobine. Vérifier la loi de Faraday  $e = -d\Phi/dt$  le plus quantitativement possible.

Le courant induit est converti en tension via la résistance d'entrée de l'oscilloscope (le phénomène que l'on visualise étant de l'ordre de la dizaine de ms, l'influence de la capacité d'entrée du scope est négligeable car  $\tau_{oscillo} \approx 13 \mu s$ ). Remarque que l'effet s'oppose à la cause : le rapprochement du pôle Nord provoque la circulation d'un courant qui fait apparaître un pôle de même nature (effet répulsif) sur la face supérieure de la bobine. De même, il apparaît un pôle Sud sur la face supérieure de la bobine lorsque l'on éloigne le pôle Nord (la création d'un pôle Sud tendant à s'opposer à l'éloignement de la face Nord de l'aimant). On illustre ainsi le signe négatif de la loi de Lenz - Faraday : le sens du courant induit est tel qu'il tend, par ses effets, à s'opposer à la cause qui lui a donné naissance (loi de modération de Lenz).

**Transition :** Comment peut-on quantifier la susceptibilité d'un circuit à répondre à la variation de flux? Le composant qui est le plus sensible à la variation de flux c'est la bobine - expliquer pourquoi.

## 2 Étude d'un phénomène d'induction : couplage de deux oscillateurs

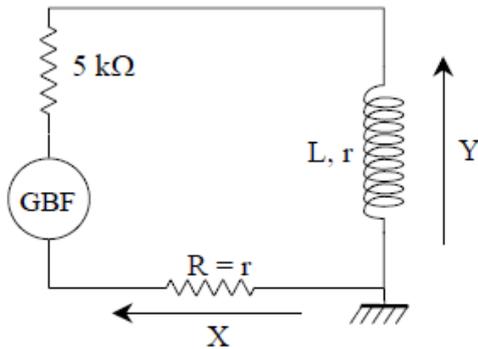
Dans cette expérience, le coefficient de couplage  $M$  entre les deux bobines, qui dépend de la distance, influence directement sur les deux fréquences de résonances du montage :  $f_1 = f_0/\sqrt{1+\theta}$  et  $f_2 = f_0/\sqrt{1-\theta}$ . Ainsi, la mesure de ces deux fréquences peut permettre de remonter à  $\theta = M/\sqrt{L_1 L_2}$  mais ça ne doit pas être le but de cette manip. Pour ça, il y a plus simple :

**Expérience :** Mesure de  $M$  en fonction de la distance. On excite un circuit primaire avec un GBF + bobine + résistance pour mesurer  $U = Ri_1$ . On approche une bobine aux bornes de laquelle on mesure la tension à ses bornes. Voir montage « Couplage des oscillateurs » pour plus de détail.

**Transition :** En fait, on comprend qu'un même circuit peut être à la fois induit et inducteur. Cet effet est démultiplié lorsque le flux du champ B à travers ledit circuit est amplifié par la géométrie (enroulement de spires).

### 3 Caractérisation de la fem d'auto-induction

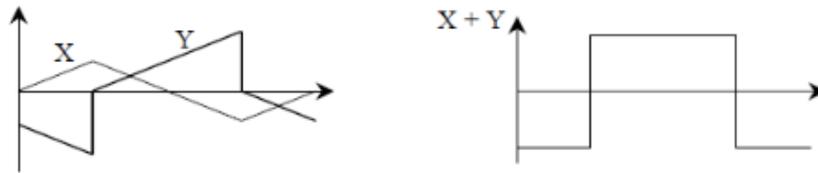
On se propose tout à la fois de vérifier la loi de l'auto-induction  $u_L = L \frac{di}{dt}$  et de mesurer l'inductance propre  $L$  d'une bobine. Voir le protocole dans [2], p. 44. On met en place le circuit suivant :



Le choix des constituant est le suivant. La bobine est quelconque, pendant l'année on a mené cette manip avec avec une boîte à décade d'inductances Danbridge ENSP2733 réglée sur 0,1 H. La résistance  $r$  de la bobine est mesurée au ohmètre et appliquée sur la boîte à décades de résistances  $R = r$ . La résistance de 5 kΩ est simplement là pour limiter le courant dans le circuit et ne pas placer le GBF en situation de saturation. **Si on n'a pas assez de signal dans le circuit, diminuer cette résistance!** Pour pouvoir placer la masse à l'endroit désiré il faut découplé le circuit du GBF via un transformateur d'isolement.

Le traitement est le suivant : on envoie un triangle de fréquence comprise entre 100 et 1000 Hz, la tension X est alors proportionnelle au courant  $i$  au facteur  $-R$  près, et la tension Y vaut  $L di/dt + ri$ .

Observation :



On mesure pour chaque fréquence  $f$  les grandeurs suivantes :

- $Peak - Peak(X) = a$
- $Période(X) = T$
- $Peak - Peak(X + Y) = b$

de sorte que  $di/dt = 2a/RT$  et  $e = b/2$ . On vérifie alors que  $e = f(di/dt)$  est une droite de pente  $L$ !

**Conclusion :** Nous avons mis quantitativement en évidence les phénomènes et lois régissant l'induction et l'auto-induction. Riche en application car permet de propager une action mécanique à distance et sans contact (freinage par induction, mais surtout **moteurs!**)

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

**PLAN :** \_\_\_\_\_

1. Production d'énergie électrique : la cellule photovoltaïque
2. Conversion d'énergie électrique : le transformateur

**BIBLIOGRAPHIE :** \_\_\_\_\_

- [2] *Quaranta IV*.
- [11] Hprépa, Électronique II, PSI/PSI\*
- [34] Sextant, *Optique expérimentale*.
- Polycopiés de TP Montrouge *photorécepteurs et production et conversion de puissance*.

**IDÉES À FAIRE PASSER :** \_\_\_\_\_

La production d'énergie électrique se fait généralement dans des conditions non satisfaisante pour son utilisation domestique, d'où la nécessité de la conversion.

**Introduction :** L'électricité est déjà une des principale source d'énergie utilisée aujourd'hui dans le monde et, avec l'essor des énergies renouvelables et des véhicules électriques, cette tendance est promise à s'accroître au fil des prochaines décennies. La question de la production, du transport, et de la conversion de cette énergie est donc primordiale, et se pose notamment la problématique du rendement de chaque étape. Nous allons nous intéresser à la production et à la conversion de puissance au niveau domestique.

## 1 Production d'énergie électrique : la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque permet de convertir l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. On dispose de cellules en silicium qui sont fabriquées à partir d'une jonction PN. Les cellules photovoltaïques sont optimisées pour fournir la puissance maximale pour un éclairage dont la distribution spectrale est celle du rayonnement solaire ([34], p. 84).

Expérience : Mesure de la caractéristique de la cellule polycristalline illuminée par une quartz-iode - cf. [34], p. 84 et polycopié *photorécepteurs*.

Quel est le rendement de ce type de dispositif?

Expérience : Tracer la puissance et le rendement en fonction du courant ( $P/\text{flux}$  reçu par la thermopile sans le filtre IR) en fonction du courant. En déduire le point nominal de fonctionnement - cf. [34], p. 85.

**Transition :** L'énergie produite par les panneaux photovoltaïques ou par d'autres engins de production est ensuite transportée sous des tensions de milliers de volt. L'énergie étant généralement consommée sous 220 V (monophasé) un transformateur est nécessaire.

## 2 Conversion d'énergie électrique : le transformateur

Le transformateur permet de modifier la valeur de la tension alternative. Il comporte un circuit primaire constitué de  $N_1$  spires soumises à une tension  $U_1$  et un circuit secondaire de  $N_2$  spires soumis à la tension  $U_2$ . Les deux circuits électriques sont couplés par un circuit magnétique fermé (primaire en convention générateur et secondaire récepteur).

Expérience : mesure du rendement en fonction de l'intensité dans le circuit 2, in [2], p. 496. Changer de rhéostat pour balayer une plage de courant la plus grande possible. Détermination du courant de fonctionnement nominal et comparaison avec la notice.

On trouve bien sûr un rendement inférieur à 100%. Si on veut l'améliorer il faut identifier l'origine des pertes.

Expérience : estimation des pertes fer et de pertes cuivre :

- Pertes fer - En ouvrant le circuit secondaire, pertes par effet joule nulles et pertes fer importantes dans cette configuration (alimenter en tension nominale : y arriver en augmentant **progressivement** la tension). Pour avoir une indication correcte on retranchera à cette valeur la puissance lue sur le wattmètre lorsque le transfo est débranché ([2], p. 492 et poly de TP production et conversion de puissance).
- Pertes cuivre - Évaluer les pertes cuivre en court-circuitant le secondaire sur un ampèremètre puis en augmentant **lentement**  $U_1$  jusqu'à ce que  $i_2$  atteigne la valeur mesurée en charge. A ce stade mesurer la puissance délivrée par le primaire : c'est la puissance à délivrer à vide, donc pour lutter contre les pertes!

Vérifier la conservation  $W_1 = W_2 + W_{fer} + W_{cu}$ . On a donc bien identifier toutes les pertes du circuit!

Remarque : Il s'agit aussi d'évaluer les incertitudes sur les valeurs de pertes estimées!

**Conclusion :** Ici conversion de puissance électrique, existe aussi conversion de puissance électrique en mécanique (moteur).

**BONUS :** \_\_\_\_\_

- Lire éventuellement [2], p. 502 sur l'utilité du transformateur d'isolement.
- Pour la conversion d'énergie continu/continu, il faut utiliser un hacheur. On peut décider le jour J de le présenter!

# MP n° 22 : Amplification de signaux

**PLAN :** \_\_\_\_\_

1. Amplification en tension
2. Amplification en puissance
3. Montage global

- [4] Quaranta III
- [17] Duffait d'électronique
- [26] Malvino
- [30] BUP571, en deuxième ou troisième lecture (explique la théorie de la double jonction...)

**BIBLIOGRAPHIE :** \_\_\_\_\_

**IDÉES À FAIRE PASSER :** \_\_\_\_\_

L'amplification de signaux n'est pas un gadget, c'est un réel besoin dans la vie de tous les jours car la plupart des sources que l'on utilise ne sont pas capables de débiter des puissances suffisamment importantes pour faire fonctionner des éléments de faible impédance d'entrée (typiquement un haut parleur).

**Introduction :** Brancher brièvement un microphone ENSP1799 sur un haut-parleur (HP) ENSP3800. On constate qu'aucun son ne sort du haut parleur. Brancher le même micro sur un oscilloscope en haute résolution, on voit bien un signal de l'ordre du mV. On peut donc constater que le micro envoie une tension beaucoup trop faible pour être amplifiée par le HP, et surtout une puissance ridicule (pour avoir 1 W avec une telle tension il faudrait un courant de 1000 A!). Il faut donc amplifier le signal! Faire mention notamment du signal des capteurs qui est généralement de faible amplitude et faible puissance et qui doit lui aussi être amplifié avant d'être réinséré dans la chaîne électronique d'un système.

## 1 Amplification en tension

On va se servir d'un dipôle actif bien connu, l'amplificateur opérationnel.

### 1.1 Montage non inverseur

Voir [24], pp. 91-93.

Expérience : Faire le montage, constater l'amplification, mesurer le gain et comparer à la valeur déduite des composants.

### 1.2 Produit Gain $\times$ Bande passante

Expérience : Tracer le diagramme de Bode pour différentes valeurs de  $R_2$ , donc du gain, et quantifier la conservation du produit Gain  $\times$  Bande passante, cf. [17], p. 81. Comparer à la valeur de la notice?

Pour limiter la distorsion du signal amplifié il faut avoir la bande passante la plus grande possible, ce qui est incompatible a priori avec un gain trop grand. Il y a donc un compromis à trouver.

### 1.3 Courant limite débité

Expérience : Voir [24], p. 105 pour mettre en évidence expérimentalement la limitation en courant de sortie.

On en déduit la nécessité d'amplifier en puissance derrière l'AO, et surtout de débité dans un circuit avec une impédance d'entrée relativement élevée!

**Transition :** Si on branche cette partie du montage directement au haut-parleur, on constate qu'aucun son ne sort. En effet, la résistance de sortie du montage est prouvée être égale à  $R_C$  largement supérieure à la résistance d'entrée du HP. Le montage réalisé permet d'amplifier le signal mais ne permet pas d'alimenter une charge de faible impédance et donc débiter de la puissance. Il faut le faire suivre d'un étage de puissance

## 2 Amplification en puissance

Tout au long de ce montage on utilise des **transistors NPN BD439**.

### 2.1 L'effet transistor

L'idée de cette partie, qui ne doit pas prendre trop de temps, est de présenter une première approche du transistor. Le principe est le suivant (cf. [30], à partir de la page 514) : **un très faible courant de base suffit pour permettre le passage d'un courant beaucoup plus important dans le collecteur et l'émetteur (c'est l'effet transistor)**. Cet effet n'est possible que si le transistor est correctement polarisé. A ce stade il faut absolument lire le malvino [26], p.129-131. C'est FONDAMENTAL!

Expérience : Réaliser l'expérience 1 du Quaranta [4], p. 462 pour extraire la caractéristique du transistor NPN, et la valeur du facteur  $\beta$ .

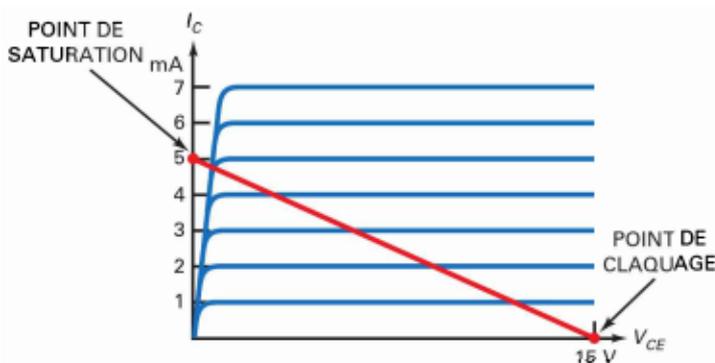
Ça permet de bien mettre en évidence l'aspect amplification du multipôle, et de trouver le coefficient associé (qui est la dérivée de la courbe). Remarquer que la mesure de  $\beta$  peut se faire à l'aide d'un transistor-mètre (mais à quel point de fonctionnement mesure-t-il? Mystère...)! Remarquer aussi que, contrairement à l'AO qui est un amplificateur actif dans le sens où il est lui-même alimenté et fournit de l'énergie en sortie, le transistor est un dipôle passif qui commande simplement la valeur du courant circulant dans le circuit en aval, lequel est alimenté extérieurement. On peut ensuite trouver le faisceau de caractéristique du transistor :

Expérience 2 : Réaliser l'expérience 3 du Quaranta [4], p. 464

Cette expérience n'est **pas fondamentale d'un point de vue manipulateur**, par contre le résultat est crucial! Il faut surtout bien comprendre les différentes zones de comportement :

- Lorsque  $V_{CE}$  est petit (typiquement inférieur à 1 V), la cellule émetteur-collecteur se comporte comme une diode idéale : le courant collecteur augmente très rapidement lorsque la tension varie peu.
- Une fois que la diode collecteur est polarisée en inverse (il faut  $V_{CE}$  en gros de l'ordre de 0,7 V); le collecteur recueille tous les électrons qui passent de l'émetteur à la base, le courant est alors constant et ne dépend que de l'occupation de la base, c'est-à-dire de  $I_B$ .

Sur un transistor polarisé en inverse (voir [26], schéma 5-16.a) p.145) on comprend que la tension aux bornes de la résistance  $R_C$  est simplement  $V_{CC} - V_{CE}$  et on déduit alors immédiatement la formule du courant. Dans le cas le plus pathologique où  $V_{CE} = 0$  V, la tension  $V_{CC}$  étant fixée par l'alimentation extérieure, le courant ne doit pas dépasser le courant maximal admis par le transistor. Ceci fixe une valeur minimale pour  $R_C$ . On peut alors tracer un graphe équivalent à :



Le faisceau de caractéristiques correspond au tracé de la deuxième expérience, pour différentes valeurs de  $I_B$ . La droite de charge est telle que la relation courant/tension exprimée ci-dessus est vérifiée. Les deux conditions devant être remplies, l'intersection entre la caractéristique adéquate et la droite de charge impose le point de fonctionnement du transistor.

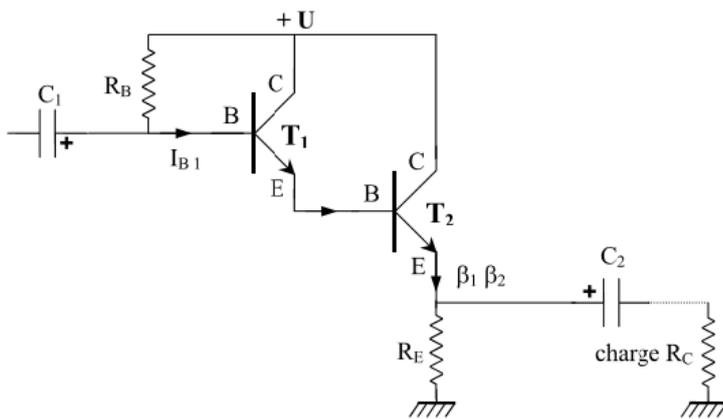
Remarque : il faut maintenant aller lire le Malvino [26], p.198-201 pour comprendre pourquoi le comportement du transistor diffère en régime alternatif de son comportement en régime statique. Notamment : pourquoi il y a de la distorsion, d'où vient la résistance interne, pourquoi sa valeur dépend du courant de fonctionnement, quel est son ordre de grandeur. Il faut surtout avoir à l'esprit que les grandeurs capitales  $X_i$  donc les grandeurs continues (grandeurs de repos) alors que les grandeurs minuscules  $x_i$  sont les grandeurs sinusoïdales.

Remarque : On trouve entre autres dans le quaranta III [4], p.466, les définitions des coefficients hybrides. Ils ne sont pas utiles pour ce montage mais peuvent aider à comprendre certains protocoles - à lire en seconde lecture.

### 2.2 Amplification

Plutôt que le montage usuel Push-pull, on fait ici un montage Darlington. Les principales références pour ce paragraphe sont : [4], p.96; [26], p.235 et [17], p.132-133

L'avantage de ce montage est triple :



**ATTENTION!** C'est un montage de puissance qui va délivrer dans la résistance  $R_E$  une intensité et une tension importantes. Il faut prendre une résistance de puissance, et non une boîte AOIP ou à décade usuelle.

Pour le reste,  $C_1 = 100 \mu\text{F}$  (ou plus),  $R_B$  est une boîte à décades,  $C_2 = 1000 \mu\text{F}$ .  $U$  est l'alimentation de puissance + 15 V.

- Il a un super gain en courant (de l'ordre du produit des beta des deux transistors)
- Il a une impédance d'entrée importante de sorte qu'il ne perturbe pas le fonctionnement de l'étage précédent
- Il a une impédance de sortie faible de sorte qu'il débite aisément dans une charge de faible impédance d'entrée telle que le HP.

Pour comprendre l'utilité du Darlington il faut déjà écrire les quelques relations suivantes, déduites du fonctionnement intrinsèque des deux transistors (voir [17], p.132-133) : autour du premier transistor on a d'une part  $I_{C1} = \beta_1 I_{B1}$  et par la loi des noeuds d'autre part il vient  $I_{E1} = (\beta_1 + 1)I_{B1}$ . Or par construction,  $I_{E1} = I_{B2}$  et le fonctionnement du seconde transistor impose

$$I_{E2} = I_{B2} + I_{C2} = (\beta_2 + 1)(\beta_1 + 1)I_{B1}$$

Le Darlington, du point de vue de l'amplification en courant, se comporte comme un unique transistor de gain approximativement égal à  $\beta_1\beta_2$  (de l'ordre de 10000!).

#### Choix de $R_E$ :

C'est la maximisation du rendement qui permet de fixer  $R_E$ . Le calcul est chiant, mais donne que  $\eta$  est maximal pour  $R_E = R_C$  et vaut alors  $1/16 \approx 6,25\%$ . Prendre pour  $R_C$ , donc aussi pour  $R_E$ , une valeur proche de  $50 \Omega$  (c'est a priori la résistance d'entrée du HP).

Remarque : L'impédance de sortie du montage est en parallèle avec les résistances internes des transistors (que l'on a déjà évoquée). La relation  $R_E = R_C$  n'est donc pas une condition d'adaptation d'impédance à proprement parler!

#### Choix de $R_B$ :

La résistance  $R_B$  sert à régler le point de fonctionnement du Darlington. Elle doit être choisie telle que la tension aux bornes de la résistance  $R_E$  égale  $U/2$ . A date de test elle vaut  $198 \text{ k}\Omega$ .

#### Mesures possibles :

Alimenter le montage global par un GBF ( $f \approx 1 \text{ kHz}$ ).

- **Gain en tension** : Mesurer les tensions en entrée (avant la capa) X et en sortie (avant la capa) Y; en déduire le gain en tension  $A_V$  du montage. Ce gain doit être légèrement inférieur à 1. Cela appuie a posteriori la nécessité de l'étage de pré-amplification.
- **Excursion maximum** : Visualiser les tensions à l'oscilloscope en position DC. Augmenter l'amplitude du GBF. A partir d'un certain niveau (entre 5 et  $-V$ ), le signal de sortie Y commence à se distordre par le bas. Mesurer la valeur à partir de laquelle la distorsion apparaît. *En remarquant que l'on a en sortie la relation  $U = V_{CE} + V_E = V_{CE} + Y$  on a  $Y_{min} = U - V_{CE,max}$ . Or  $V_{CE,max} = U/2 + \Delta V$  et  $\Delta V = R_{eq}U/2R_E = U/4$  si  $R_E = R_C$ . Ainsi,  $V_{CE,max} = 3U/4$  et on doit avoir  $Y_{min} = U/4$ . Cette formule ne marche que si  $R_E = R_C$  exactement et si le point de fonctionnement est exactement à  $U/2$ .*
- **Gain en courant, gain en puissance** : Toujours dans les conditions d'excursion maximum, mesurer en alternatif le courant entrant dans le montage de puissance ( $15,07 \mu\text{A}$  à date) et celui circulant dans la résistance de charge ( $10,6 \text{ mA}$  à date). En déduire le gain en courant  $A_I (= 2694$  à date) [la mesure de  $I_C$  nécessite un calibre pouvant supporter plus de  $2 \text{ A}$ !]. En déduire le gain en puissance du montage  $A_P = A_V \cdot A_I (= 0,98 * 2694 = 2640$  à date) et conclure.

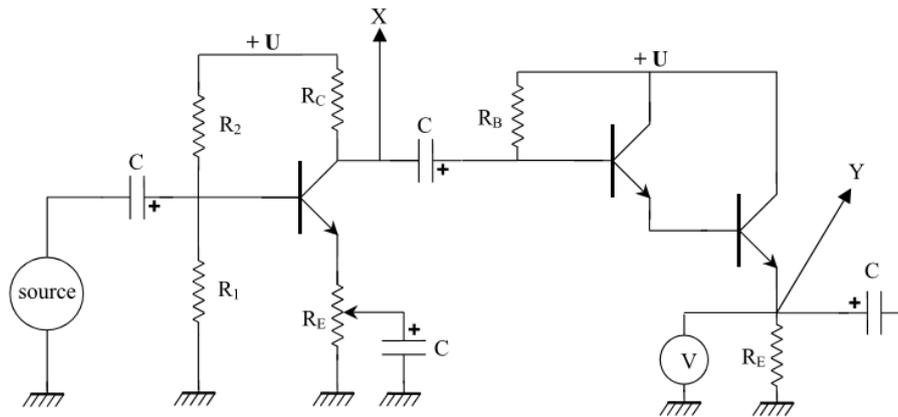
Remarque : Ne pas comparer la valeur du gain en courant au produit  $\beta_1\beta_2$  car le produit des  $\beta$  donne le rapport  $I_E/I_B$  alors que le gain mesuré correspond au rapport  $I_{R_C}/I_B$ . On pourrait mesurer  $I_E$  pour vérifier la relation mais on ne connaît pas la valeur exacte des gains en courant des deux transistors dans les conditions de fonctionnement (à tester éventuellement).

- **Rendement de l'étage de puissance :** Il vaut théoriquement 1/16 lorsque l'on est à l'excursion maximum. Dans ces conditions, mesurer  $U_{alim}$  et  $I_{C0}$  du transistor de puissance. En déduire la puissance  $P_{alim} = U_{alim}I_{C0}$  fournie par l'alimentation à l'étage de puissance. Mesurer la tension efficace aux bornes de la résistance de charge. En déduire la puissance qu'elle reçoit ( $P = U^2/R$ ) et calculer le rendement  $\eta = P/P_{alim}$ . Comparer à la valeur théorique.

**Transition :** Et le clou du spectacle!

### 3 Let's swing! :D

Faire le montage suivant (ça revient à raccorder les deux montages précédents, en prenant soin de ne garder qu'une capa au milieu sinon ça diminue la capacité effective!). Pour préserver vos organes auditifs, régler un gain pas trop élevé, quitte à l'augmenter ensuite!



#### Réglage du point de fonctionnement :

Mesurer  $V_E$  à l'aide d'un voltmètre continu (cf. schéma) et ajuster la valeur de  $R_B$  pour avoir  $V_E \approx U/2$ .

#### Mise en route du montage :

Brancher un GBF en entrée avec un signal de faible amplitude, et de fréquence audible. Visualiser en DC le signal de sortie fourni par l'étage amplificateur (X), vérifier que le signal est correct (pas de distorsion) et jouer sur le potentiomètre de façon à avoir un signal raisonnable. Visualiser alors en DC le signal de sortie fourni par l'étage de puissance (Y). Son amplitude doit être sensiblement la même qu'en X.

#### Bouquet final :

Remplacer le GBF par un micro, brancher le haut-parleur en sortie. Chanter (juste). Prier (pour que ça marche). Majorer!

**Conclusion :** Je vous laisse la rédiger, j'en ai marre là :)

#### BONUS :

1. Quelle est l'impédance d'entrée du haut-parleur? D'autres composants qui ont une faible impédance d'entrée?
2. les caractéristiques d'un amplificateur qui nous intéressent généralement sont les valeurs des amplifications, et les gains associés; éventuellement les phases; les impédances d'entrée et de sortie (c'est fondamental!) et le rendement énergétique lorsqu'on amplifie en puissance.
3. Tout le travail en courant est ramené aux tensions en travaillant avec des résistances connues.

# Amplification de signaux (bis)

Alternative pour le début du montage. Tout au long de ce montage on utilise des **transistors NPN BD439**.

## 4 L'effet transistor

L'idée de cette première partie, qui ne doit pas prendre trop de temps, est de présenter une première approche double : du transistor, et de l'amplification de signal. Le principe du transistor est le suivant (cf. [30], à partir de la page 514) : **un très faible courant de base suffit pour permettre le passage d'un courant beaucoup plus important dans le collecteur et l'émetteur (c'est l'effet transistor)**. Cet effet n'est possible que si le transistor est correctement polarisé. A ce stade il faut absolument lire le malvino [26], p.129-131. C'est :FONDAMENTAL!

**Expérience 1 : Réaliser l'expérience 1 du Quaranta [4], p. 462 pour extraire la caractéristique du transistor NPN, et la valeur du facteur  $\beta$ .**

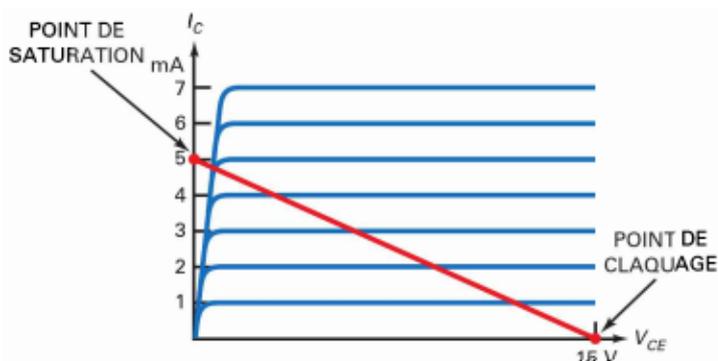
Ça permet de bien mettre en évidence l'aspect amplification du multipôle, et de trouver le coefficient associé (qui est la dérivée de la courbe). Remarquer que la mesure de  $\beta$  peut se faire à l'aide d'un transistor-mètre! On peut ensuite trouver le faisceau de caractéristique du transistor :

**Expérience 2 : Réaliser l'expérience 3 du Quaranta [4], p. 464**

Cette expérience n'est pas fondamentale d'un point de vue manipulo, par contre le résultat est crucial! Il faut surtout bien comprendre les différentes zones de comportement :

- Lorsque  $V_{CE}$  est petit (typiquement inférieur à 1 V), la cellule émetteur-collecteur se comporte comme une diode idéale : le courant collecteur augmente très rapidement lorsque la tension varie peu.
- Une fois que la diode collecteur est polarisée en inverse (il faut  $V_{CE}$  en gros de l'ordre de 0,7 V) ; le collecteur recueille tous les électrons qui passent de l'émetteur à la base, le courant est alors constant et ne dépend que de l'occupation de la base, c'est-à-dire de  $I_B$ .

Sur un transistor polarisé en inverse (voir [26], schéma 5-16.a) p.145) on comprend que la tension aux bornes de la résistance  $R_C$  est simplement  $V_{CC} - V_{CE}$  et on déduit alors immédiatement la formule du courant. Dans le cas le plus pathologique où  $V_{CE} = 0$  V, la tension  $V_{CC}$  étant fixée par l'alimentation extérieure, le courant ne doit pas dépasser le courant maximal admis par le transistor. Ceci fixe une valeur minimale pour  $R_C$ . On peut alors tracer un graphe équivalent à :



Le faisceau de caractéristiques correspond au tracé de la deuxième expérience, pour différentes valeurs de  $I_B$ . La droite de charge est telle que la relation courant/tension exprimée ci-dessus est vérifiée. Les deux conditions devant être remplies, l'intersection entre la caractéristique adéquate et la droite de charge impose le point de fonctionnement du transistor.

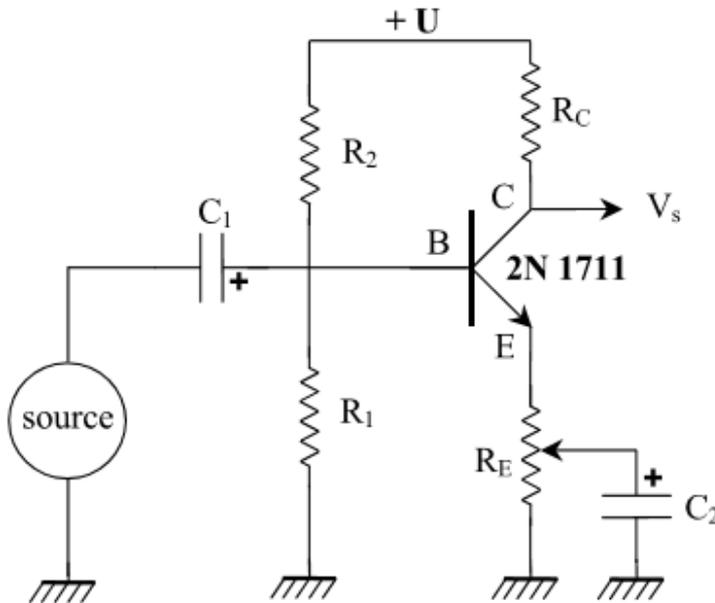
Remarque : il faut maintenant aller lire le Malvino [26], p.198-201 pour comprendre pourquoi le comportement du transistor diffère en régime alternatif de son comportement en régime statique. Notamment : pourquoi il y a de la distorsion, d'où vient la résistance interne, pourquoi sa valeur dépend du courant de fonctionnement, quel est son ordre de grandeur. Il faut surtout avoir à l'esprit que les grandeurs capitales  $X_i$  donc les grandeurs continues (grandeurs de repos) alors que les grandeurs minuscules  $x_i$  sont les grandeurs sinusoïdales.

Remarque : On trouve entre autres dans le quaranta III [4], p.466, les définitions des coefficients hybrides. Ils ne sont pas utiles pour ce montage mais peuvent aider à comprendre certains protocoles - à lire en seconde lecture.

## 5 Amplification en tension ([17], pp. 119 et suivantes)

On commence par un montage classique : transistor en mode émetteur commun fonctionnant en classe A. Emetteur commun signifie que le potentiel de l'émetteur est constant (il est donc commun du point de vu des signaux périodiques qui vont nous intéresser), la notion de classe A relève de la position du point de fonctionnement sur la droite de charge (voir [17], p.119). C'est un montage qui permet d'avoir un gain en tension élevé, mais qui à l'inconvénient d'avoir une impédance de sortie importante, comme nous allons le mettre en évidence plus bas.

On va travailler avec des signaux périodiques d'amplitude comprise entre 0 et  $U$ . De fait, on sera bien en classe A si le point de fonctionnement au repos est  $V_{CE} = U/2$ . On travaille sur le schéma suivant :



Prendre (dans un premier temps sans réfléchir, puis lire la suite...) :

- $U = +15\text{ V}$  (Alimentation continue - ne pas oublier de relier le 0 à la masse du circuit!)
- $R_E \approx 200\ \Omega$  - Potentiomètre. Ça n'est techniquement pas indispensable mais c'est pratique pour les mesures!
- $R_C = 800\ \Omega$  - Boîte AOIP
- $R_1 = 1400\ \Omega$  - Boîte à décades
- $R_2 = 8\text{ k}\Omega$  - Boîte AOIP
- $C_1$  et  $C_2$  capacités chimiques d'au moins  $100\ \mu\text{F}$

Remarque sur le branchement du potentiomètre : Le potentiomètre est un tripôle. Entre les deux pôles extrêmes, la résistance est fixe et vaut ce qui est indiqué sur le potentiomètre (on dispose de  $100\ \Omega$  ou  $470\ \Omega$ ). Entre le pôle d'entrée et le pôle du milieu, la résistance varie entre 0 et la résistance max indiquée sur le montant. Dans le circuit présenté le potentiomètre assure qu'entre l'émetteur et la masse il y a bien la résistance  $R_E$  donc on a besoin ( $200\ \Omega$  donc ici deux potentiomètres de  $100\ \Omega$  montés en série). Par contre, on peut régler la part de cette résistance avant ou après le condensateur en branchant celui-ci convenablement et en tournant le bouton!

Remarque sur la polarité des capacités chimiques : Elle doit absolument être respectée! Le pôle - du côté du potentiel le plus faible, le pôle + du côté du potentiel le plus fort.

Remarque sur le rôle des capacités chimiques : La capacité  $C_1$  est telle qu'elle doit couper le signal continu (d'une part parce qu'il ne doit pas venir modifier le point de fonctionnement du transistor, d'autre part parce qu'on ne veut surtout pas l'amplifier, ce serait désastreux pour les composants du circuit!). On veut donc une pulsation de coupure très faible, ce qui explique la nécessité d'une capacité importante - voir [17], p.120. La capacité  $C_2$  a un rôle plus subtil qui sera expliqué plus bas.

### Choix de $R_C + R_E$ :

$U$  étant imposée par une alimentation continue (par exemple  $+15\text{ V}$ ), la résistance  $R_C + R_E$  impose le courant collecteur. Il doit être choisi de sorte que la puissance reçue par le transistor lui soit supportable. Dans notre cas,  $P_{max} = 10\text{ W}$  et au point de fonctionnement,  $V_{CE} = U/2 = 7,5\text{ V}$  donc  $I_C = \frac{U}{2(R_C + R_E)}$  ne doit pas dépasser  $P/V_{CE} = 1,3\text{ A}$ . Aussi l'amplification en tension est  $A_V = R_C/R_E$  de sorte qu'on a intérêt à prendre  $R_C$  grand. On prend par exemple  $R_C + R_E = 1000\ \Omega$ . On a alors  $i_C = \frac{U}{2(R_C + R_E)} = 7,5\text{ mA}$ . Il y a évidemment une infinité de combinaisons possibles pour faire une telle somme de deux résistances. On pose ici (et on le justifiera plus tard)  $R_C = 800\ \Omega$  et  $R_E = 200\ \Omega$

### Choix de $R_1$ et $R_2$ :

Pour assimiler la diode base/émetteur à une diode idéale, la tension  $V_{BE}$  doit s'approcher de la tension seuil de l'ordre de  $0,6\text{ V}$ . C'est le pont diviseur de tension formé par  $R_1$  (variable),  $R_2$  (fixée pour s'assurer qu'elle ne s'annule pas, éliminant tout risque de détérioration du transistor si le courant venait à ne plus être limité), et  $R_E$ , qui fixe cette condition de potentiel.  $R_E$  étant déjà fixé, on a  $V_E = R_E i_C \approx 1,5\text{ V}$  et  $V_C = 15 - R_C i_C \approx 9\text{ V}$ . On vérifie bien  $V_{CE} = V_C - V_E = 7,5\text{ V}$ , soit  $U/2$ . Finalement, le transistor est au bon point de fonctionnement. Reste à fixer  $V_{BE}$  à  $0,6\text{ V}$ , donc  $V_B = 2,1\text{ V}$ .

Un calcul donne (d'après [17], p.122)  $V_B = V_{alim} R_A / (R_1 + R_2)$ . Pour rendre les choses simples on prend  $R_1 + R_2 = 10 \text{ k}\Omega$  et  $R_1 = 10000 V_B / V_{alim} = 1400 \Omega$ , donc  $R_2 = 8,6 \text{ k}\Omega$ .

Remarque sur le choix de  $R_1$  et  $R_2$  : Le plus simple pour fixer  $R_1$  et  $R_2$  est de fixer  $R_2$  à  $8000 \text{ k}\Omega$  et de varier  $R_1$  jusqu'à avoir  $V_{CE} = U/2$  et alors on est sûr que les autres conditions sont satisfaites (le vérifier!).

### De l'utilité de $R_E$ et $C_2$ :

$R_E$  stabilise le point de fonctionnement (c'est son seul intérêt) qui dépend alors de la valeur exacte de  $R_1$  dans une moindre mesure. On peut donc vérifier à l'aide d'un voltmètre continu que le potentiel du collecteur est bien de  $9 \text{ V}$  comme attendu, et constater que cette valeur dépend peu d'une variation raisonnable de  $R_1$ . Pour comprendre cet effet de stabilisation, voir en deuxième lecture [17], p. 122. A ce stade on peut essayer de comprendre l'utilité de  $C_2$  : l'effet stabilisant de  $R_E$  sur la composante continue du signal devient déstabilisant pour le signal alternatif (voir à nouveau [17], idem). On a donc besoin que le signal continu passe dans la résistance  $R_E$ , mais pas la composante sinusoïdale; c'est le rôle du condensateur chimique de très forte capacité.

### Résultats / Mesures

Remarque : On mesure en sortie le potentiel  $V_C$ . Celui-ci est par construction oscillant autour d'un point de reposé fixé à  $9 \text{ V}$ . Pour se débarrasser de la composante continue du signal on sera inspiré d'utiliser une troisième capacité chimique de très forte capacité et visualiser le signal à sa sortie

- **Distorsion** : En réglant le potentiomètre  $R_E$  on voit que le gain augmente, mais à partir d'une certaine valeur de la distorsion apparaît. On ne la voit pas forcément très bien, elle est plus flagrante en FFT!
- **Gain en tension** : Observer l'influence du potentiomètre sur le gain. Son expression est  $A_V = -R_C / R_E$ . Constater le déphasage de  $\pi$  (on peut mettre l'oscillo en AC pour virer la composante continue, ou regarder en XY : on doit voir une droite!). Faire une mesure. Lorsque  $R_E$  tend vers 0, le gain ne devient pas infini : c'est la résistance interne de la jonction, faible mais non nulle, qui assure une borne pour  $A_V$  ... Ici on a négligé la résistance interne de l'émetteur en alternatif et c'est probablement faux. Il faudra prendre le truc calmement, en attendant on peut se référer à la formule du Malvino [26], p.203-205... Sauf qu'il faut savoir comment mesurer  $r'_e$  la résistance interne... on voit ça mercredi.
- **Impédance de sortie** : Commencer par mesurer la tension  $V_0$  sans la résistance de charge, puis placer une résistance variable (boîte à décades) en sortie du montage et ajuster sa valeur pour avoir  $V_S = V_0/2$ ; on a alors (cf. [17], p.118)

$$R_{VAR} = Z_S \approx R_C$$

(à date,  $800 \Omega$ ).

- **Impédance d'entrée** : voir [26], p.207.

On peut passer au montage à charges réparties pour se débarrasser de la distorsion, mais on perd énormément en gain! (Je sais plus où j'ai lu ça...)



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

**PLAN :** \_\_\_\_\_

1. Mise en forme par modulation en fréquence
2. Transport dans un câble coaxial
3. Détection par boucle à verrouillage de phase

**BIBLIOGRAPHIE :** \_\_\_\_\_

- [4] *Quaranta III*.
- [17] *Expériences électronique*, Duffait.
- Polycopiés de TP Montrouge *télécommunications et ondes II*.
- MP 28 – Télécommunication de S. Bourdeux

**IDÉES À FAIRE PASSER :** \_\_\_\_\_

il faut prendre un peu de temps pour expliquer la nécessité de mettre le signal en forme pour transporter l'information. Il s'agit ensuite d'illustrer les étapes du traitement tout au long de la chaîne de transmission.

**Introduction :** Télégraphe - Ondes hertziennes - Radio = beaucoup d'information à grande vitesse, sur de grandes distances (société d'information). Comment la transporter? Principalement ondes électromagnétiques (câble, ondes, fibre optique) - dans des gammes de fréquences qui ne sont pas du tout celles de l'information elle-même.

## 1 Mise en forme par modulation en fréquence

une sinusoïde c'est trois données : amplitude, fréquence et phase. On pourrait décider de moduler chacune des trois mais on va ici parler seulement de modulation en fréquence, cf. [17], p. 222 (Chap IX, 3) grâce à un oscillateur contrôlé par une tension (VCO) - utiliser des GBF GX245 n°605 pour ceux à asservir en fréquence, et un Keysight ENSP 4465 pour créer le signal de base (plus simple de changer la fréquence).

**Expérience :** On commence par caractériser le VCO - Mesurer la fréquence du signal de sortie en fonction de la tension continue envoyée en entrée, et caractériser le coefficient de proportionnalité  $f_{OCT} = f_0 - k_{OCT}U$ .

Le principe est simple : un GBF a un signal de sortie dont la fréquence dépend de l'amplitude d'un signal d'entrée. On prend le paragraphe de Duffait et on mesure :

**Expérience :**  $m$  associé à la disparition du fondamental, et du deuxième harmonique. On vérifie la règle de Carson pour différentes valeurs de  $m$  et on montre que  $B/(1+m)$  est constant.

Ainsi, pour avoir 98% de l'énergie transmise il faut consacrer au transport de l'information une bande passante de fréquence  $2\Delta f + 2f_m = 2(1+m)f_m$ .

Remarque sur le critère de Carson : Relever la hauteur de quelques pics pour quelques fréquences dans le spectre du signal pour remonter à la puissance. On cherche la plage de fréquence pour avoir 98% de la puissance incluse dans ladite plage. Deux pics = 97%, trois pics = 99%, le critère de Carson est bien respecté!

**Transition :** On a trouvé un moyen de transmettre l'information (on aurait pu faire de la modulation d'amplitude ou de phase aussi), maintenant comment la transporter?

## 2 Transport dans un câble coaxial

Toutes les mesures doivent se faire en réflexion pour éviter les problèmes d'impédances. On peut faire deux mesures (choisir!) :

**Expérience :** On mesure soit la vitesse de propagation dans le câble, soit l'atténuation linéique  $A = -20 \log(V_s/V_e)/L$ . La mesure est faite pour des câbles de différentes longueurs puis on moyenne, voir polycopié de télécommunications.

On trouve seulement un ordre de grandeur de l'atténuation... Comparer ici à celle dans une fibre optique (0,2 dB/1km).

---

**Transition :** Reste à pouvoir détecter le signal, c'est-à-dire le démoduler!

---

### 3 Détection par boucle à verrouillage de phase

Voir [17], p. 233 et polycopié S. Bourdeux - Les boucles à verrouillage de phase sont des éléments essentiels des systèmes actuels de télécommunications (AM et FM), elles existent sous forme de circuit intégrés et font appel à des techniques analogiques ou numériques. Ces sont des systèmes bouclés composés d'un comparateur de phase, d'un filtre passe-bas et d'un oscillateur commandé en tension. Le comparateur de phase délivre une tension  $V$  qui dépend de la différence des phases instantanées du signal de sortie et du signal d'entrée. Le filtre élimine les composantes à haute fréquence de la tension  $V$  et fournit une tension à « basse fréquence » qui agit sur la fréquence instantanée du signal délivré par le VCO de manière à la rapprocher de la fréquence du signal d'entrée. Quand  $f_s$  et  $f_e$  sont égales la boucle est verrouillée et stable! A ce moment-là, la boucle peut suivre les variations de  $f_e$  dans un intervalle de fréquence  $2f_v$ , appelé « plage de verrouillage ». L'évolution qui conduit au verrouillage de la boucle n'est possible que si la fréquence d'entrée appartient à un intervalle de fréquence  $2f_c$  appelé plage de capture.  $f_c$  dépend du type de comparateur de phase et du filtre passe bas. Voir aussi [4], p. 53.

**Expérience :** On retrouve qualitativement le comportement énoncé ci-dessus. Mesurer les plages de capture et de verrouillage.

Brancher ce montage sur celui du I. via un câble coaxial (mise en forme + transport + détection!). Visualisez le signal de sortie et comparez son allure à celle du signal d'entrée. Prendre un signal informatif triangulaire et vérifiez que la démodulation reste correcte.

*On constate en général dans  $vF$  un peu de bruit HF qu'on pourrait éliminer par filtrage ultérieur (en dehors de la boucle). On peut l'atténuer en augmentant un peu la valeur de  $C$  (on diminue alors la plage de capture) ou en diminuant la fréquence du signal informatif. On peut aussi employer la voie comme signal informatif (utilisez le micro 457B) et envoyez le signal  $vF$  dans un HP via un amplificateur de puissance*

---

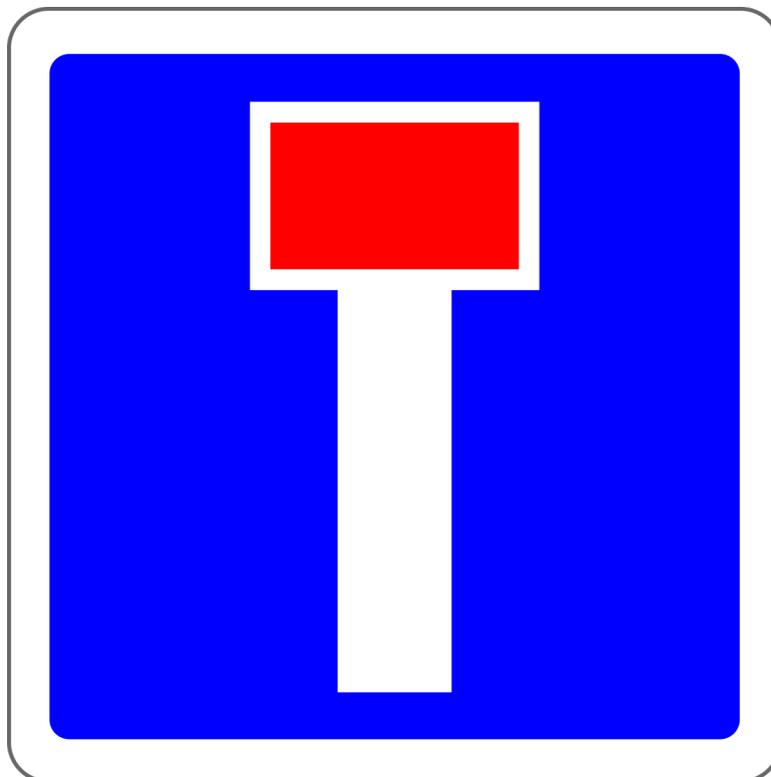
**Conclusion :** On a illustré les étapes principales de la chaîne de télécommunication. Noter que tout cela repose sur le fait d'avoir de très bons oscillateurs d'où l'importance des oscillateurs à quartz notamment dans les radios, téléphones, etc...

**BONUS :**

---

1. Avantage de la modulation en fréquence : pas d'atténuation, vitesse beaucoup plus importante, multiplexage
2. Bonus sur la modulation en amplitude : on multiplie le signal utile (5 kHz) à une porteuse (500 kHz). Beaucoup de puissance dans la porteuse, ce qui n'est pas utile car elle ne porte pas d'information.

**MP n° 24 : Signal et bruit.**





## MP n° 25 : Mesure de fréquences temporelles (domaine de l'optique exclu).

### PLAN :

---

1. Mesure par comptage, principe du fréquencemètre
2. Mesure par comparaison, détection synchrone
3. Mesure numérique, transformée de Fourier

### BIBLIOGRAPHIE :

---

- Polycopié de TP Montrouge *Ondes II*.
- [17] R. Duffait, *Expériences d'électronique*.
- [13] F. Cottet, *Traitement des signaux et acquisition de données*.

### IDÉES À FAIRE PASSER :

---

Les mesures de fréquences temporelles peuvent être faites avec une grande précision. C'est d'ailleurs pour cela qu'on ramène souvent d'autres mesures à des mesures de fréquence.

**Introduction :** Définir la fréquence - nombre de fois qu'un phénomène périodique se répète par seconde donc la seconde est ultra bien définie! On se ramène souvent à des mesures de temps pour mesurer autre chose d'ailleurs.

## 1 Mesure par comptage, principe du fréquencemètre

Cette technique de mesure repose sur une mesure temporelle, durant laquelle on compte un nombre de phénomènes répétitifs.

**Expérience :** Mesure de la fréquence d'un pendule par acquisition informatique.

C'est un pendule simple, on compte le nombre de période sur un temps assez long (tant que l'amplitude change pas trop en fait). On répète l'expérience pour un angle identique (dans la mesure du possible) et on traite l'incertitude statistique sur la mesure.

**Transition :** Cette idée de compter le nombre de répétitions du motifs en un certain temps est à la base du fréquencemètre numérique mais qui est aujourd'hui un outil relativement désuet étant donné la précision que l'on peut atteindre avec d'autres méthodes. En effet, avant de pouvoir faire la différence entre deux fréquences très proches avec cette méthode il faut attendre longtemps pour obtenir un décalage notable (typiquement une période), et cela nécessite d'avoir un signal particulièrement stable (pas d'amortissement du tout sur le pendule par exemple)... Mieux vaut alors comparer la fréquence à mesurer à une autre fréquence parfaitement connue.

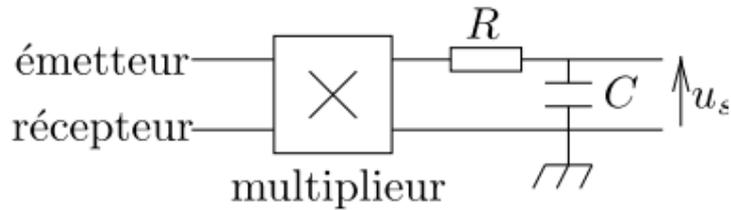
## 2 Mesure par comparaison, détection synchrone

On connaît le phénomène de battements : lorsqu'on a deux signaux de fréquences proches, la somme est une sinusoïde modulée par une sinusoïde. On peut grâce à l'effet doppler acoustique créer deux signaux de fréquence voisines, on cherche alors à mesurer la fréquence du piézo mobile connaissant celle de l'émetteur par détection synchrone. D'ailleurs, si le récepteur s'éloigne de l'émetteur, on s'attend à mesurer une fréquence :

$$f_{rec} = f_0 \left( 1 - \frac{v_{rec}}{c_{son}} \right)$$

**Expérience :** On récupère les deux signaux des émetteur/récepteur. On les multiplie puis on filtre passe-bas le résultat. On mesure la fréquence du signal en sortie de filtre : c'est la différence entre les deux signaux initiaux!

**Transition :** Enfin la méthode moderne de mesure de fréquence est une méthode numérique par calcul de la transformée de fourrier du signal, mais elle pose aussi un certain nombre de problèmes que nous allons illustrer ici.



### 3 Mesure numérique, transformée de Fourier

Pour cette partie il faut absolument demandé à utiliser le module pour projeter l'écran de l'oscilloscope via le vidéo-projecteur.

#### 3.1 Influence de l'échantillonnage sur le spectre

Définir l'échantillonnage ([13], p. 133), la période d'échantillonnage. Tout l'enjeu est dans le choix de  $T_e$  : plus  $T_e$  est courte, meilleure est la restitution du signal, mais plus on a de données à traiter et ça pose des problèmes de temps de calcul. **Question** : y a-t-il un bon compromis? (Insister sur le fait qu'on est seulement intéresser par la reproduction fidèle de la FRÉQUENCE du signal, pas de sa forme précise).

Expérience (Visualiser les problèmes d'échantillonnage) : Les oscilloscopes KEYSIHT DSOX2002A dont on va se servir sont de très bons oscilloscopes et sont par conséquent construits pour nous éviter de rencontrer des problèmes d'acquisition. Notamment, la durée d'acquisition et la fréquence d'échantillonnage sont reliées par la taille de la mémoire interne et on ne peut pas les faire varier séparément (i.e. dégrader volontairement la fréquence d'échantillonnage). De ce fait, si on veut diminuer la fréquence d'échantillonnage on doit augmenter la durée d'acquisition et l'écran devient illisible. La bonne méthode consiste à choisir une fréquence d'échantillonnage, laisser l'oscilloscope acquérir le signal à cette fréquence, stopper l'acquisition et zoomer sur l'écran pour voir l'effet de la discrétisation. On peut aussi faire des captures de signaux pour aligner les trois signaux suivants :

On commence par envoyer un sinus à une fréquence  $f_s$  donnée, par exemple 50 kHz, que l'on échantillonne de différentes manières pour montrer à chaque fois comment le signal est restitué :

- Commencer par acquérir le signal avec  $f_e \gg f_s$ . Constaté qu'on voit ce qu'on s'attend à voir.
- Diminuer la fréquence d'échantillonnage. On cherche à montrer que lorsque  $f_e \approx 2f_s$  le signal échantillonné ne permet plus vraiment de remonter à la fréquence réelle du signal  $f_s$ . Ce n'est pas vraiment tranché donc il faut y aller avec des pincettes (on reviendra un peu plus tard sur la détermination précise du critère de Shannon)!
- Choisir enfin une fréquence  $f_e$  très inférieure à  $f_s$  pour voir que le signal ne ressemble à rien.

On voit donc que si on ne prend pas assez de points, le spectre du signal n'est pas fidèle à la réalité. Il semble y avoir un critère de l'ordre de  $f_e \geq 2f_s$ . Regarder au tableau l'effet du peigne de dirac (échantillonnage) sur le spectre du signal, voir [17], p. 48. Le repliement de spectre explique le critère de Shannon. Ainsi, on note  $f_{max}$  la fréquence maximale existant dans le signal, ou au moins la fréquence maximale que l'on veut pouvoir récupérer. A noter que certains signaux ont un spectre naturellement borné (par exemple 20 kHz si on veut de l'audio, ou 24 image/s si c'est du visuel), mais la plupart des signaux se décompose sur une base infinie de sorte que la reconstitution du signal est limitée par le nombre de fréquences prises en compte. Si on veut pouvoir résoudre le spectre du signal jusqu'à  $f_{max}$  on doit s'assurer que  $f_e \geq f_{max}$ . On le met en évidence maintenant :

Expérience (Visualiser le repliement de spectre) : Pour observer le repliement de spectre il faut un signal riche en harmonique; typiquement un créneau. La fréquence d'échantillonnage divisée par 2 sera la fréquence limite observable sur le spectre (i.e. **on ne peut pas voir de fréquence plus rapide que  $f_e/2$ , c'est important de le préciser!**) de sorte qu'il faut la choisir correctement et affichée le spectre pour voir qu'effectivement on voit le repliement. Ici on sait que c'est du repliement donc tout va bien mais on aurait pu naïvement interpréter les harmoniques repliées comme des harmoniques réelles ce qui aurait complètement fausser la mesure!

A l'aide de ce phénomène on peut préciser la détermination du critère de Shannon :

Expérience (Préciser le critère de Shannon) : On envoie un sinus dans l'oscilloscope et on échantillonne à une certaine fréquence  $f_e$ . On commence par régler la fréquence du sinus sur  $f_s < f_e$  et on voit le pic apparaître, de sorte que lorsqu'on augmente  $f_s$  le pic se décale vers la droite (vers les hautes fréquences) jusqu'à l'extrémité accessible du spectre  $f_e/2$ . Au-delà le pic commence à se décaler vers la gauche! C'est le repliement, et le critère de Shannon!

Zoomer sur le spectre et observer que les pics ne sont pas exactement des pics. Remarquer aussi la donnée sur la fenêtre de l'oscilloscope du paramètre de résolution. Comment est-ce qu'on peut jouer sur tout ça?

### 3.2 Influence de la durée d'acquisition sur le spectre

On va à partir de maintenant travailler dans le cadre du critère de Shannon et restreindre notre étude à une mesure de fréquence d'un signal **discret** et **périodique**. L'aspect limitant la résolution de la TF est le fenêtrage temporel. A priori le signal brut périodique infini est, du point de vue de l'oscilloscope dont l'acquisition a une durée finie, multiplié par une fonction porte, donc chaque fréquence du spectre est habillée d'un sinus cardinal.

Expérience (Discuter la résolution spectrale) : Caractériser le spectre par les différentes hauteurs, voir [13], p. 183. Un moyen d'atténuer l'effet du fenêtrage est de diminuer l'importance des discontinuités de raccordement en convoluant le signal par un signal connu nul aux extrémités de la fenêtre. Présenter expérimentalement les différents types de fenêtre et leur intérêt. Visualiser enfin l'importance du nombre de points acquis sur la résolution, comparer  $f_e/N$  à la donnée de résolution affichée par l'oscilloscope. Voir [13], p. 168 et [17], p. 53.

Il faut lire le Cottet [13] avec attention et essayer de trouver des choses à mesurer sur ces différentes fenêtres!

### 3.3 Application à la mesure de stabilité en fréquence de deux GBF

Expérience : On prend deux GBF identiques et on fait passer leur signal à travers un multiplicateur. On peut alors regarder la TF du signal et faire en sorte de pouvoir mesurer leur écart. Autre méthode : on peut simplement additionner les deux signaux pour obtenir un signal somme de deux fréquences proches et essayer de les séparer à l'oscilloscope avec ce qu'on vient d'étudier.

**Conclusion :** On a illustré diverses méthodes qui sont toutes utilisées actuellement selon la nature du signal, la précision désirée et la gamme de fréquence. Au quotidien on a plutôt tendance à utiliser la première méthode (jour, battements du cœur, vitesse de rotation, ...), les mesures de précision sont généralement faites par détection synchrone, et enfin la méthode numérique est la méthode actuelle pour mesurer des fréquences classiques dans les domaines de la recherche, médical, etc...

#### BONUS :

- Pour compléter le montage on peut regarder le pont de Wien-Robinson, in [2], p. 352.



## MP n° 26 : Mesure de longueurs.

### PLAN :

---

1. Principe d'une mesure de longueur à l'échelle astronomique, la parallaxe
2. Mesure de longueurs à l'échelle humaine, l'écho-localisation
3. Mesure de longueur micrométrique, épaisseur d'une lame de verre

### BIBLIOGRAPHIE :

---

- [28] *Optique physique*, Mauras.
- [34] Sextant, *Optique expérimentale*.

### IDÉES À FAIRE PASSER :

---

Les mesures de longueurs sont un défi perpétuel pour la physique : méthodes sur plusieurs dizaines d'ordre de grandeur (Exemples en subatomique : Taille de l'électron =  $< 10^{-22}$  m, taille du proton =  $0,88 \cdot 10^{-15}$  m, Taille d'un quark =  $< 10^{-18}$  m. Exemple en astro : Distance Terre-Soleil =  $150 \cdot 10^9$  m, demi grand axe de l'orbite de pluton =  $5,9 \cdot 10^{12}$  m, Distance à la galaxie d'Andromède :  $2,2 \cdot 10^{22}$  m) -> Dynamique 44!

**Introduction :** Pour affiner notre connaissance de l'organisation stellaire ou pour concevoir la micro-informatique de demain la mesure de longueur est un défi majeur de précision à tout les échelles.

## 1 Principe d'une mesure de longueur à l'échelle astronomique, la parallaxe

La parallaxe repose sur un calcul géométrique simple et permet de ramener la mesure d'une longueur importante à la mesure de petits angles dont le repérage peut être fait avec une grande précision.

**Expérience :** On commencer avec les goniomètres alignés et on explique comment on a fait l'alignement. Les angles de référence ont été préalablement relevés. On fait avec chacun le pointé de la croix (correctement placée) et on mesure les angles associés. Estimation des incertitudes sur les angles de référence et sur le pointé dues à la largeur de la croix, ceux-ci étant probablement les plus imprécis.

Il faut avoir préparé un tableur qui convertit tout correctement, notamment les incertitudes en prenant bien en compte la tangente (et prendre le temps de le discuter pendant la préparation).

**Expérience :** Comparer avec précautions la distance trouvée à celle mesurée par le télémètre laser.

**Remarques :** Dans le principe réel on n'a pas deux goniomètres qui pointent la même étoile au même instant mais un seul qui la pointe à 6 mois d'intervalle! D'ailleurs, la méthode réellement utilisée en astronomie relève plutôt d'une mesure de flux lumineux reçu d'une étoile en particulier dont la décroissance en  $1/r^2$  permet de connaître la distance à l'étoile.

**Transition :** Comparaison avec le télémètre laser pas réalisable à l'échelle astronomique mais à l'échelle de la classe. Pour les mesures de longueur à notre échelle, il existe d'autres télémètres tels que télémètre acoustique.

---

## 2 Mesure de longueur à l'échelle humaine, l'écho-localisation

C'est typiquement la technologie utilisée dans le principe par les sonars marins, l'échographie et par de nombreux animaux pour se situer dans l'espace (chauves-souris, dauphins, ...). La méthode repose sur l'évaluation de la distance par mesure de temps de vol.

**Expérience :** Réaliser une courbe d'étalonnage de la distance en fonction du temps avec les incertitudes et ajouter un point à la courbe d'étalonnage pour une distance connue. Attention, la vitesse du son est sensible à la température donc il se peut qu'il faille reprendre toute la droite devant le jury. On peut vérifier la valeur de la pente en la comparant à la valeur du son dans l'air à la température de la salle.

Expérience : Placer le récepteur à une distance inconnue et remonter via la droite d'étalonnage à ladite distance. Comparer à la valeur du banc.

**Transition :** A notre échelle et dans les objets du quotidien il existe des objets dont la longueur est non déterminable par les techniques précédentes dans ce cas possible d'utiliser un Michelson par exemple.

### 3 Mesure d'une longueur micrométrique, épaisseur optique d'une lame de verre

Comment mesurer l'épaisseur d'une lame de verre? On va mesurer son épaisseur, connaissant son indice, en regardant la différence de marche imposée au trajet de la lumière hors et dans la lame.

Expérience : Récupérer un Michelson au contact optique du coin d'air en lumière blanche SEULE (tout est correctement monté, commenter le choix des composants) et relever la position.

On introduit une lame de microscope sur un des bras, les franges disparaissent à cause de la trop grande différence de marche (blanc d'ordre supérieur). L'idée est de mesurer la distance à ajouter en charriotant pour compenser le chemin optique en trop, mais on serait alors limité par la précision du vernier. Pour gagner en précision on peut superposer un éclairage au sodium et compter les franges qui passent lorsqu'on charriote.

Expérience : Mesure de l'épaisseur de la lame et évaluation des incertitudes lié à l'interfrange. Comparer à la valeur mesurée au pied à coulisse, ou peut être plutôt la taille caractéristique trouvée sur internet (0,13 – 0,17 mm).

Remarque : L'indice de la lame en lumière blanche n'est pas bien connu mais on a pris un indice de verre moyen typiquement 1,5... on est peut-être pas obligé de soulever ce problème en live.

**Conclusion :** Nous avons présenté trois méthodes de mesure à trois échelles différentes et ainsi évalué des distances sur beaucoup d'ordres de grandeur. Il est possible d'évaluer des distances bien plus petites non pas par mesure directe mais en utilisant d'autres effets liés à la taille comme la diffraction des électrons par exemple qui nous permet de remonter à la structure du réseau cristallin. Pour une majorité de longueur en deçà de l'angström on se contente d'ailleurs souvent de majorer les tailles.

## MP n° 27 : Systèmes bouclés.

### PLAN :

1. Un système bouclé stable, la boucle à verrouillage de phase
2. Un système bouclé instable, l'oscillateur à pont de Wien

### BIBLIOGRAPHIE :

- [24] Krob.
- Polycopié de TP Montrouge *Systèmes bouclés et Traitement du signal*.
- Polycopié du cours d'électronique de J. Neuveu.

### IDÉES À FAIRE PASSER :

Les systèmes bouclés sont omniprésents dans la vie de tous les jours. Ils ont des caractéristiques différentes selon leur utilisation (stabilisation ou oscillations). On s'intéresse en général à leurs propriétés de précision, rapidité, stabilité, ...

**Introduction :** Système bouclé = au moins une boucle de rétroaction : signal d'entrée modifié par le signal de sortie. Asservissement (régulation, stable) ou oscillations (instable).

Expérience : Illustrer le principe de la rétroaction sur la petite manip du moteur asservi en position? Introduire les propriétés de rapidité, précision, stabilité...

## 1 Un système bouclé stable, la boucle à verrouillage de phase

La PLL est usuellement un maillon de la chaîne de traitement d'un signal dont l'objectif est de démoduler des fréquences. Elle doit permettre d'asservir la phase du signal de sortie sur celle du signal d'entrée. Elle repose sur un système a priori simple : le VCO (Oscillateur Contrôlé en Tension) dont la fréquence de sortie dépend de la tension d'entrée. On l'étudie rapidement (c'est la chaîne de rétroaction du montage en fait!)

Expérience : Étude du VCO : on envoie un signal de tension continu en entrée du VCO et on mesure la fréquence du signal de sortie. On en déduit la caractéristique du fonctionnement, et la pente  $k_{OCT}$  telle que  $f_{OCT} = f_0 - k_{OCT}U$ .

On l'insère alors dans le montage global :

Expérience : Il faut prendre le temps de décrire le montage (voire, si on s'en sent capable, le monter devant le jury) et le rôle des composants : où est la chaîne directe? où est le comparateur? où est la rétroaction? En admettant que l'on soit verrouillé, que se passe-t-il si on change la fréquence d'entrée?

Il faut donc quantifier la stabilité du système à une perturbation : comment évolue la sortie si la fréquence d'entrée change?

Expérience : Mesure de la plage de verrouillage, et de la plage de capture. Pas de comparaison théorique possible (ça dépend trop de l'amplitude, de la fréquence etc...). Noter que la plage de capture dépend de la qualité du filtre et la plage de verrouillage de la qualité du VCO.

Remarque : On a l'impression que moins le filtre est sélectif, plus la plage de capture est large et qu'on aurait donc intérêt, en extrapolant, à enlever le filtre... C'est vrai, mais en réalité on envoie pas un sinus mais un signal radio avec beaucoup de fréquence et on veut suivre *la bonne fréquence* de sorte qu'il faut un **filtre très sélectif!**

**Transition :** Dans la première partie on a étudié un système bouclé dont l'objectif est la stabilité de la sortie par rapport aux perturbations de l'entrée! On va maintenant voir un système bouclé permettant de générer des oscillations : L'oscillateur à pont de Wien.

## 2 Un système bouclé instable, l'oscillateur à pont de Wien

L'idée de l'oscillateur est de générer des oscillations à une fréquence choisie à partir du bruit d'entrée (l'énergie vient bien sûr de l'alimentation de l'AO!). On étudie déjà le système en boucle ouverte et on distingue la partie rétroaction, le filtre à « pont de Wien » qui est un filtre passe bande et une partie « chaîne directe » amplificatrice (AO, résistance variable).

Expérience : On commence par étudier le filtre - On enregistre le diagramme de Bode via interface, et on ajuste par la bonne formule pour le passe bande :

$$G = \frac{K}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \quad \text{et} \quad \phi = -\arctan \left( Q \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right)$$

Expérience : Faire varier  $R_2$  pour avoir des oscillations. On obtient une valeur pour  $R_2$ , et on calcule le rapport  $R_2/R_1$  avec incertitude en espérant trouver 2.

### Régime transitoire

La tension vérifie  $u(t) = Ae^{-t/\tau} \sin(\sqrt{1 - \alpha^2} \omega_0 t)$  avec  $\alpha = 1 - R_2/2R_1$ .

Pourquoi y a un moins dans l'exponentielle?

Si c'est  $V_{sat}$  qui limite la croissance, pourquoi ça écrête pas? en fait le début de la non linéarité, qui va mené à la saturation, n'est pas anguleuse.

Quel schéma bloc équivalent au pont de Wien on peut dessiner? Attention dans le schéma bloc, il n'y a pas d'entrée, le signal vient des composants actifs.

Expérience : Enregistrer le régime transitoire pour une valeur de résistance donnée, et ajuster pour trouver  $\tau$ , et  $\alpha$ .  $\tau$  doit vérifier  $\alpha = 1/\omega_0\tau$ . On peut ajuster  $\alpha$  en fonction de  $1/\tau$  et ainsi remonter à la pulsation de l'oscillateur, à comparer à la valeur théorique  $1/RC$ .

### Stabilité

Comment comparer la stabilité du pont de Wien à celle du quartz? On déclenche sur une oscillation et on envoie le déclenchement loin à gauche de l'écran pour voir la 1000ième oscillation. Si c'est un bon oscillateur la 1000ième oscillation sera stable, sinon l'instabilité fera vibrer le signal. A priori en mesurant la largeur de la persistance autour de la 1000ième période on mesure  $1000\delta T$  d'où on déduit  $\delta f = f\delta T/T$ .

**Conclusion :** Les systèmes bouclés peuvent permettre d'avoir une oscillation stable, utile pour servir de source de signal oscillant pour des montages comme la boucle à verrouillage de phase. Système instable puis PLL qui a plein d'utilité, notamment remplacer les oscillateurs à quartz dans de nombreux systèmes (c'est beaucoup moins précis facilement miniaturisable).

### BONUS :

1. D'où vient la limite d'oscillation du pont de Wien  $R_2/R_1 = 2$ ? Annulation du terme de dérivée première pour avoir un oscillateur harmonique, si le rapport est  $> 2$  on a non pas un amortissement mais une amplification.
2. Dans l'oscillateur, on pourrait se demander pourquoi on met un filtre aussi pourri. En effet, si on veut un oscillateur plus précis en fréquence il suffirait de prendre un filtre beaucoup plus restrictif, typiquement un RLC. En fait c'est une raison industrielle : le pont de Wien est un des meilleur passe-bande que l'on puisse faire sans utiliser de bobine. Quel intérêt? Les bobines sont très compliquées à miniaturiser!! Donc si on veut faire un filtre dans un espace très réduit le pont de Wien a un intérêt!

## MP n° 28 : Instabilités et phénomènes non-linéaires.

### PLAN :

---

1. Du linéaire au non linéaire : le pendule
2. Une bifurcation fourche : l'elastica
3. Une bifurcation de Hopf : Van der Pol

### BIBLIOGRAPHIE :

---

- [10] P. Brasselet, Mécanique 1ere année.
- [24] Krob, pour Vand der Pol
- [33] Quaranta de méca, pour Borda

### IDÉES À FAIRE PASSER :

---

**Introduction :** Jusqu'à un niveau relativement avancé, et mis à part quelques exercices exotiques, l'essentiel de la physique est enseignée dans l'approximation linéaire. Si la plupart des phénomènes majeurs le sont effectivement (à commencer par l'électromagnétisme!) d'autres au contraire sont foncièrement non linéaires et ne se ramènent à cette approximation que dans le cadre des petites perturbations. Que peut-on dire expérimentalement de tels phénomènes? - Dans ce montage on définit la non linéarité par l'apparition, dans le signal de sortie, de fréquences différentes de la fréquence d'excitation.

## 1 Du linéaire au non linéaire : période d'un pendule

C'est le phénomène le plus simple. Il s'agit d'introduire le montage mais il ne faut pas y passer trop de temps! L'intérêt est clairement dans la suite. Revoir la démonstration de Borda dans un livre de mécanique, typiquement celui de P. Brasselet [10]. Noter que la formule de la période dépend de l'approximation choisie pour le  $\sin(\theta)$ !

Expérience : On fait un relevé d'oscillations pour en déduire le lien entre période et amplitude. Veiller à explorer les amplitudes maximales acceptables par le capteur (proche de  $90^\circ$ ) pour avoir une gamme de mesure la plus large possible et un ajustement numérique qui a un sens. On peut ajuster la période par la formule de Borda et/ou tracer le portrait de phase (dérivé sous Qtiplot) pour différentes valeurs d'amplitude. Dans les deux cas, constater la non-linéarité et mettre en évidence son importance relative pour les grandes oscillations.

**Transition :** Le pendule est un exemple typique de non-linéarité en physique du fait d'une équation non-linéaire. Celle-ci ne fait pas apparaître de phénomène radicalement nouveau mais le comportement exact du système varie du comportement linéaire pour les grandes amplitudes et on a mis alors en évidence l'apparition de nouvelles harmoniques. On va maintenant étudier un système intrinsèquement non-linéaire dont la réponse change radicalement selon le régime étudié. On parle de bifurcation.

## 2 Stabilité, instabilité : l'élastica

Voir *MP17 - Métaux* pour le protocole. L'idée ici n'est pas de remonter au module d'Young, mais d'étudier les positions d'équilibre stables et instables et de déterminer le seuil d'instabilité  $m_c$ . On trace la bifurcation fourche au tableau, et on cherche à estimer  $m_c$  avec précision. On peut motiver cela par un intérêt industriel / architectural : mieux vaut savoir quelle masse on peut mettre sur le régleur sans risquer le flambage et (en extrapolant) l'effondrement du bâtiment.

**Remarque :** a priori, avant le flambage l'équation est linéaire! Donc on ne peut pas voir le caractère non linéaire aux petites amplitudes. Aussi, vu le titre du montage, il faut insister sur le fait que cette non-linéarité dite de bifurcation entraîne une violente instabilité du système.

**Transition :** Sur le système précédent le caractère non linéaire engendre une instabilité qui semble être principalement indésirable. Il existe des systèmes qui mettent à profit ces deux aspects (instabilité et non-linéarité) pour générer des oscillations stables et de fréquence contrôlée.

### 3 Oscillations générées par la non linéarité

Voir [24], mais attention : le câblage ne correspond pas à celui de la plaquette de Montrouge, même si le résultat est le même bien sûr. Je pense qu'il faut rester assez qualitatif sur cette manip, l'exploitation de la droite proposée par le Krob ne donne rien de très convaincant.

Expérience : L'objectif est déjà de caractériser le comportement du Van der Pol en fonction de  $\epsilon$  a-t-on un système stable ou instable? Quel est la limite? Que vaut la période des oscillations? On peut aussi regarder le spectre de la sortie. Voir leçon sur les oscillateurs, et photocopié de TP!

---

**Conclusion :** Ouvrir sur les solitons et (si on a 30 s pour conclure) expliquer vite fait le phénomène : le milieu se déforme de sorte que l'avant de la vague avance moins vite, et l'arrière plus vite donc la dispersion du paquet d'onde est compensée! (exemple en hydro, optique, acoustique, et même au sein de cristaux d'uranium...). **BONUS :** \_\_\_\_\_

1. On cherche des caractéristiques propres à la non linéarité : apparition de nouvelles fréquences, existence de plusieurs positions d'équilibre stable ou instable, effets de saturation.
2. Avant de se lancer dans l'ouverture sur les solitons il faut s'armer un peu et par exemple relire la page Wikipédia « Soliton » et sur les solitons en hydro, cette page qui permet de se rafraichir la mémoire sur Korteweg-de Vries

## MP n° 29 : Ondes : propagation et condition aux limites.

### PLAN :

---

1. Propagation non dispersive du son dans l'air
2. Conditions aux limites et dispersion dans le banc hyperfréquence
3. Illustration de l'adaptation d'impédance

### BIBLIOGRAPHIE & RÉFÉRENCES DIVERSES :

---

1. Polycopiés de TP *montrouge Ondes I & II*.
2. [27] D. Mauras, Électromagnétisme.
3. [12] Hprépa, Ondes, 2eme année.

**Introduction :** La définition d'une onde est nécessairement rendue vague par la diversité des phénomènes concernés. Elle est donnée sur [slide](#) et je suggère de mettre les points importants (en gras) au tableau : une onde correspond à une modification des propriétés physiques d'un milieu **matériel ou immatériel** engendrée par une action locale qui se répercute/se propage d'un point à un autre du milieu avec une **vitesse finie** déterminée par les caractéristiques du milieu. Au passage de l'onde, chaque point du milieu reproduit, avec **un décalage temporel et une éventuelle atténuation**, la perturbation originelle engendrée par une source fournissant de l'énergie au milieu. La propagation résulte généralement du **couplage entre deux champs** appelés grandeurs couplées. On distingue deux cas :

- Ondes progressives qui se propagent (on peut définir leur vitesse, déformation, atténuation,...).
- Ondes stationnaires qui oscillent « sur place », sensibles aux conditions aux limites .

## 1 Propagation non dispersive d'une onde acoustique dans l'air

*Ondes I* - Mesure de la vitesse du son dans l'air. Cette propagation est non dispersive de sorte que la mesure est indépendante de la fréquence.

Expérience : Faire la mesure de temps de vol pour différentes distances émetteur - récepteur (la pente donne la vitesse du son) et relever la décroissance de l'amplitude reçue qui doit varier, pour des raisons géométriques, en  $1/r$ . Inclure les barres d'erreur pour discuter correctement le  $\chi^2$ .

On utilise deux transducteurs (capteurs piézoélectriques) se déformant sous l'effet d'un champ électrique et inversement sous la contrainte il apparaît des charges à la surface du matériau) dont la fréquence de fonctionnement optimale se trouve autour de 40 kHz (la régler précisément!).

**Transition :** On a étudié la propagation libre et non dispersive des ondes acoustiques dans l'air. On va maintenant imposer des contraintes à la propagation et s'intéresser à une propagation guidée et dispersive dans le banc hyperfréquence.

---

## 2 Conditions aux limites et dispersions dans le banc hyperfréquences

Notes sur le fonctionnement du banc hyperfréquence [cf. [27] et cours d'Étienne Thibierge sur les ondes (LP27)] :

- Les hyperfréquences sont des ondes électromagnétiques de fréquences comprises entre 300 MHz et 300 GHz. Elles sont utilisées dans les radars, les télécommunications et les fours à micro-ondes et sont dangereuses aux fortes puissances (pas le cas ici). Elle sont ici générées par une diode Gunn (dipôle constitué de trois parties d'un même dopage (N++/N-/N++)). Le banc est équipé d'un coupleur directionnel de sorte que l'onde réfléchie à la fin du bras principal ne pénètre pas dans le bras auxiliaire et on peut effectuer deux points de mesure indépendants.
- L'isolateur à ferrite protège l'oscillateur Gunn de la puissance réfléchie, notamment par le modulateur (variation de Z en fonction de son état de polarisation).
- La détection d'une onde se fait au moyen d'une autre diode haute fréquence qui transforme la vibration alternative de l'onde EM en signal continu proportionnel à sa valeur efficace.

- Pour connaître précisément la fréquence des ondes envoyées dans le dispositif, on utilise une cavité de résonance, de taille variable. On mesure la fréquence exacte envoyée par la diode Gunn en repérant la résonance de la cavité. Ne pas oublier de dérégler la cavité après la mesure de fréquence pour garder un maximum d'intensité dans le banc.
- Le bras secondaire est fermé à son extrémité de manière à obtenir deux modes de propagation une onde progressive dans le bras principal et une onde stationnaire dans l'autre. La fréquence ne modifie pas l'onde directement mais change la position des ventres et des nœuds pour l'onde stationnaire.

Expérience (Relation de dispersion) : le guide d'onde permet une propagation monomode (TE<sub>10</sub>) suivant la relation de dispersion :

$$k_g^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 \quad \text{et} \quad \lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \lambda_0/\lambda_c}}$$

où  $\lambda_0 = c/f$ , la longueur d'onde dans l'espace libre et  $\lambda_c = 2a$ , la longueur d'onde de coupure. En terminant la ligne de coupure par un court-circuit, une onde stationnaire s'établit dans le guide. La distance entre deux maxima ou minima consécutifs est  $\lambda_g/2$ . En connaissant  $\lambda_0$ , on retrouve la relation de dispersion. On vérifie que  $a$  est cohérent avec celui donné par le constructeur.

**Transition :** La charge variable permet de modifier les conditions aux limites de la cavité d'onde stationnaire. Lorsque celle-ci est adaptée, il n'y a aucune onde réfléchi; on dit qu'il y a adaptation d'impédance.

### 3 Illustration de l'adaptation d'impédance en sortie d'un câble coaxial

[12], chap 3, pp. 68-69.

Expérience : Commencer par observer sur l'oscilloscope l'impulsion incidente et réfléchi : l'étalement indique que la propagation est dispersive.

On peut étudier l'effet de l'impédance  $Z$  vue par le signal au bout du câble d'impédance  $Z_c$ . Le coefficient en réflexion en tension est  $r_v = \frac{Z - Z_c}{Z + Z_c}$  de sorte que  $U_r = r_v U_i$  :

- si  $Z = 0$  il y a réflexion totale;
- si  $Z$  diminue,  $U_r$  diminue et quand  $Z = Z_c$ ,  $U_r$  est nulle : on parle d'adaptation d'impédance;
- si  $Z$  continue de diminuer,  $U_r$  devient négative.

Expérience : Pour être plus précis, on fait une étude de  $U_r$  en fonction de  $Z$  et on trace  $U_0/U = 1 + Z_c/R$  ( $U_0$  correspond à la réflexion totale) en fonction de  $1/R$ , la pente donne  $Z_c$ . Pour chaque valeur de  $Z$  réglée au potentiostat, on mesure  $Z$  au ohmmètre et on mesure  $U$ .

On a

$$U = U_i + U_r = U_i + r U_i$$

Or  $r = \frac{Z - Z_c}{Z + Z_c}$  donc, en notant  $U_0$  la tension lorsque  $Z \rightarrow +\infty$  (tension en réflexion totale) on a  $U_0 = 2U_i$  et  $U = (r + 1)U_i$  donc

$$\frac{U_0}{U} = 1 + \frac{Z_c}{R}$$

On compare à la valeur trouvée à partir de  $L$  et  $C$  mesurées au RCL-mètre (cf. papier de C. Sayrin pour savoir quelle fréquence utiliser). Ainsi, l'étude de la propagation en fonction des conditions aux limites du câble (continuité de  $U$  et  $I$ ) nous a permis de remonter à ses caractéristiques, ici son impédance  $Z_c$

**Conclusion :** Ce montage nous a permis d'observer différentes propagations : dispersives ou non pour différentes ondes et d'observer l'influence des conditions aux limites sur la propagation. Ouvrir sur l'adaptation dans les oreilles?

## MP n° 30 : Acoustique.

### PLAN :

1. Production d'une onde acoustique de fréquence donnée
2. Propagation d'une onde acoustique
3. Détection d'une onde acoustique

### BIBLIOGRAPHIE :

- Montage 6 ondes acoustiques – S. Bourdeux
- BUP 801, *Résonance aiguë*
- [32] Optique, Pérez

### IDÉES À FAIRE PASSER :

Pour des raisons évidentes liées à leur importance pour l'Homme, les ondes acoustiques ont été longuement étudiées et sont aujourd'hui assez bien connues. Prendre garde à bien associer les ondes acoustiques à une onde de vibration couplée pression/vitesse pas forcément audible!

**Introduction :** L'acoustique concerne l'étude de production, propagation et détection d'ondes de pression. C'est un domaine dont les bases remontent à l'antiquité : la construction des amphithéâtres nécessitait une connaissance des propriétés sonores : la production, la propagation et la détection. On va ici s'intéresser à décrire ces trois caractéristiques de ces ondes.

## 1 Production d'une onde acoustique de fréquence donnée

Son créé quand on parle, par les instruments de musiques.. Dans un premier temps on étudie un moyen de production de fréquences audibles : le diapason.

**Expérience :** Étude de la résonance d'un diapason. Tracé manuel du diagramme de bode. L'objectif est de remonter à la fréquence de résonance. Voir BUP. On utilise un GBF + amplificateur de puissance (notice N392 - transformateur de puissance) pour alimenter une bobine munie d'un noyau de fer quasiment collé (mais sans contact!) au diapason. On mesure la réponse avec un micro et on trace la tension aux bornes du micro en fonction de la fréquence d'excitation.

Ajuster la courbe par (aider le fit en lui donnant des valeurs typiques pour  $Q$  - 2000 et  $f_0$  - 220) :

$$U(f) = \frac{U_0}{\sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{f_0^2}\right)^2 + \frac{1}{Q^2} \frac{f^2}{f_0^2}}}$$

Autres moyens de produire du son : haut-parleur pour les fréquences audibles, et les transducteurs pour les ultrasons. Remarque que pour être complet il faudrait s'assurer qu'il n'y a pas de réponse spectrale de l'excitation ou du micro qui pourrait entrer en conflit avec celle du diapason...

**Transition :** Une fois produite, comme l'onde acoustique se propage-t-elle?

## 2 Propagation d'une onde acoustique

Préciser la nécessité d'un milieu matériel (on pourrait le mettre en évidence avec une cloche à vide). Ici on va s'intéresser à la vitesse de la propagation, qui dépend du milieu et de la température mais pas de la fréquence du fait que l'air ne soit pas dispersif pour la propagation des ondes acoustiques. Quand on peut faire les manip à fréquences sonores ou ultra-sonores : choisir les ultrasons car on fait moins de bruits à 40kHz, les mesures sont moins parasitées, et ça fait moins mal aux oreilles.

**Expérience :** Mesure de la vitesse du son dans l'air. Méthode avec le temps de vol. On peut en profiter pour ajuster la décroissance de l'amplitude qui doit être en  $1/r$  pour des raisons géométriques. Comparer avec la valeur de  $c$  du Handbook, connaissant la température de la pièce!!! **ATTENTION!** Si la température change entre la préparation et le passage la courbe va changer de pente - il faut alors prévoir de reprendre tout la série de points devant le jury... Pour limiter cet effet on peut prévoir de prendre de nouveaux points au dernier moment de la préparation.

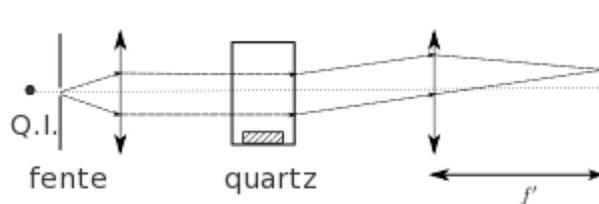
**Transition :** Pour les fréquences audibles on a bien sûr un très bon détecteur : l'oreille - Voir quelques caractéristiques de l'oreille dans la leçon associée(LP25) ! Mais comment peut-on détecter les fréquences plus élevées, typiquement les ultrasons ?

### 3 Détection d'une onde acoustique

On a déjà utilisé plusieurs outils de détection des ondes acoustiques : nos oreilles, d'abord (!) et le piézoélectrique, on peut aussi utiliser des micros... Ici on va mettre en évidence la présence de l'onde de pression (donc de densité) dans un milieu, en l'occurrence l'eau.

**ATTENTION !** Il faut absolument utiliser de l'eau permutée et ne pas toucher au quartz lorsqu'il est alimenté !

Expérience : Mise en évidence de la présence d'une onde stationnaire dans la cuve par ombroscopie. Il faut alimenter le quartz avec une alimentation haute tension (reliée à l'oscillateur, notice N243, et des câbles de sécurité). La mesure de la fréquence d'excitation se fait avec un oscilloscope + câble BNC-banane pour faire antenne. Le montage optique est celui de la diffraction de Fraunhofer (prendre des lentilles adaptées : courte focale (10 cm) en sortie de la lampe (condenseur 12 cm) pour faire l'image de la fente à l'infini, et grande focale (40 cm) après la cuve pour avoir une belle projection). Commencez par régler avec un filtre interférentiel ça se voit mieux, voire au laser.



Visualiser sur caméra CCD, tracer la courbe sur Qtiplot (créer une colonne avec les numéros des pixels) pour mesurer l'interfrange :  $i = \text{pixel} \times \text{taille d'un pixel}/2$ , et la longueur d'onde  $\Lambda$  des ultrasons se déduit de :

$$\Lambda = \lambda_0 f' / i$$

( $\lambda_0$  est la longueur d'onde de la lumière utilisée,  $f'$  la valeur de la focale de projection).

**Conclusion :** A travers ce montage, on a réalisé l'étude plus ou moins complète de l'acoustique : de la production à la détection du son !

**BONUS :** \_\_\_\_\_

- Lire la page Wikipédia sur l'acoustique, c'est super intéressant !
- Parmi les choses qu'on aurait pu mesurer : les effets de conditions aux limites par exemple la propagation des modes dans un tubes en plexiglas (cf. LP27), la dépendance de  $c$  avec la température, la nécessité du milieu matériel, l'atténuation dans différents milieux, diagramme d'émission, directivité des micros...

# MP n° 31 : Résonance.

**PLAN :** \_\_\_\_\_

1. Caractérisation d'une résonance
2. Résonance à haut facteur de qualité
3. Influence du couplage sur la résonance

**BIBLIOGRAPHIE :** \_\_\_\_\_

- [25] *Supermanuel de physique*, S. Komilikis.
- Polycopiés de TP Montrouge *Ondes I*

**IDÉES À FAIRE PASSER :** \_\_\_\_\_

Il faut illustrer toutes les propriétés de la résonance : mesure de la fréquence, du facteur de qualité, de la durée du régime transitoire. Il ne faut surtout pas laisser la phase de côté.

**Introduction :** En physique, une résonance correspond à une réponse particulièrement ample d'un système à une excitation sinusoïdale de fréquence donnée. Sous une excitation riche en harmoniques c'est cette fréquence qui va particulièrement apparaître dans la réponse du système.

## 1 Caractérisation d'une résonance

L'étude est assez bien décrite dans [17], p. 145-150 mais il faut surtout s'appuyer sur un livre de sup comme [25], chapitre 9, typiquement à partir de la page 335. Je suggère de prendre  $L = 0,1$  H et  $C = 110$  nF de sorte que la fréquence propre soit autour de 1500 Hz et que l'on puisse avoir  $Q$  petit en gardant  $R$  assez importante. Il faut mesurer ces valeurs aux RLC-mètre, de même que la résistance de la bobine, avec barre d'erreur pour obtenir une valeur théorique convenable de  $\omega_0^2 = 1/LC$  et du facteur de qualité par la suite.

### 1.1 Réponse en intensité (aux bornes de la résistance)

#### Fréquence de résonance

Expérience : Pour une valeur de résistance donnée, estimer la fréquence de résonance et constater que  $U_R$  et  $U_{GBF}$  sont en phase. Préciser alors la fréquence de résonance en mode XY pour des valeurs de  $R$  telles que  $Q$  soit successivement inférieur, de l'ordre et supérieur à 1/2. La comparer à la fréquence propre du système.

#### Facteur de qualité

La plupart du temps on cherche à avoir un filtre très sélectif, de sorte que l'on veut  $Q = \omega_0/\Delta\omega$  le plus grand possible!

Expérience : Relever le diagramme de Bode pour une valeur de  $R$  bien choisie, puis mesurer  $\omega_0$  et  $\Delta\omega$  (pulsations pour lesquelles la valeur de l'amplitude vaut le max sur racine de 2). En déduire le facteur de qualité  $Q = \omega_0/\Delta\omega$  et comparer à la valeur théorique.

### 1.2 Réponse en tension (aux bornes du condensateur)

Expérience : Tracer le diagramme de Bode pour différentes valeurs de  $R$  telles que  $Q$  soit successivement inférieur, de l'ordre et supérieur à 1/2. Constater que la résonance n'a pas toujours lieu. Faire une mesure de fréquence propre dans un (ou deux) cas où elle existe, et comparer à la fréquence propre du circuit. Corriger la formule : en amplitude,  $\omega_r = \omega_0\sqrt{1 - 1/2Q^2}$ .

Remarque : La mesure de  $Q$  nécessite de connaître la résistance avec précision, en incluant notamment celle de la bobine!

**Transition :** Les résonances étudiées sur le RLC ont une bande passante assez larges et cela peut poser problème dans certains systèmes pour lesquels on cherche une grande stabilité en fréquence (quartz de montre, diapason). Si on veut la rétrécir, il faut augmenter le facteur de qualité.

## 2 Intérêt d'une résonance à haut facteur de qualité

On étudie la résonance du diapason, construit dans le but de générer une fréquence parfaitement propre et avoir un régime transitoire assez long.

Expérience : Tracer le diagramme de Bode à la main avec une très haute résolution autour du pic! Faire bien attention à avoir tout fixé au maximum en montant l'expérience car les facteurs géométriques vont modifier les valeurs de tensions mesurées. Estimer le facteur de qualité. Frapper le diapason et faire le lien entre le grand facteur de qualité et la durée longue du régime transitoire, c'est la contre-partie!!!

On peut mettre en évidence les non linéarité du système en constatant l'apparition de fréquences de résonances au delà de la fréquence propre. Regarder dans [25] le lien entre facteur de qualité et temps caractéristique de la décroissance exponentielle des oscillations. A priori on ajuste par

$$U(f) = \frac{U_0}{\sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{f_0^2}\right)^2 + \frac{1}{Q^2} \frac{f^2}{f_0^2}}}$$

Remarque : Attention au piège classique pour lier fréquence d'excitation (du champ magnétique) et fréquence de vibration du diapason.

---

**Transition :** On a étudié deux systèmes simples possédant une unique fréquence de résonance. Y a-t-il des systèmes possédant plus de fréquences de résonance? Peut-on leur appliquer le même genre de discussion?

---

## 3 Influence du couplage sur la résonance

Cette partie est qualitative, voire optionnelle.

Expérience : Brancher la chaîne d'oscillateurs LC et constater qualitativement la multiplication des fréquences de résonance. En fonction du temps imparti on peut discuter la méthode de visualisation en s'appuyant sur l'analogie mécanique / électrique (cf. papier de C. Sayrin ou leçon LP48 sur la résonance). On peut rendre cette manip quantitative mais ça n'est pas l'objet ici - on peut éventuellement lire la notice en préparation pour se remettre les formules en tête.

---

**Conclusion :** Une résonance est donc essentiellement décrite par une fréquence et un facteur de qualité qui ne dépendent que du système étudié, indépendamment de l'excitation appliquée. Lorsqu'un système possède une fréquence de résonance celle-ci est particulièrement représentée dans les régimes transitoires sous échelon.

**BONUS :** \_\_\_\_\_

1. On peut utilement regarder la LP48 sur la résonance pour préparer ce montage.

# MP n° 32 : Couplage des oscillateurs.

## PLAN :

1. Couplage élastique de deux pendules
2. Couplage inertiel de deux circuits RLC
3. Influence du nombre d'oscillateurs couplés

## BIBLIOGRAPHIE :

- [2], Quaranta IV pour le couplage inductif.
- Polycopié de TP Montrouge *Oscillateurs*.

## IDÉES À FAIRE PASSER :

Il faut faire passer l'idée que le couplage induit des modes de vibration, notamment deux fameux : les modes symétrique et antisymétrique, et cela implique que lorsque le forçage est quelconque on observe des battements. Mettre aussi en exergue les différents types de couplage : élastique (en  $x$ ) ou inertiel (en  $dx/dt$ ). Enfin on discute de l'influence du nombre d'oscillateurs sur le nombre de fréquences propres.

**Introduction :** Ce montage invite à étudier le couplage des oscillateurs. Nous allons donc étudier deux systèmes couplés respectivement de manière élastique (pendules) ou inertielle (RLC) pour identifier les points communs et différences entre ces deux types de couplage. Enfin, nous verrons que le nombre d'oscillateurs couplés a une influence sur le nombre de fréquences de résonance.

## 1 Couplage élastique de deux pendules

Les pendules sont à interfacer avec Latispro via la plateforme d'acquisition (*a priori* ça se fait automatiquement). Mieux vaut prendre le couplage le plus faible pour bien voir les battements, et **bien serrer** le fil pour être sûr que les pendules sont bien couplées. Si on ne voit pas de battements, penser tout de suite à resserrer! Vérifier, au moins à l'œil nu, que les pendules sont identiques (masse, longueurs, etc...).

Expérience : Montrer d'abord le couplage - si on en lâche un seul et qu'on laisse l'autre immobile il se met à bouger aussi. Montrer ensuite l'existence des modes propres : si on lâche les deux ensembles ou en opposition ils restent dans ce mode. Montrer enfin les battements.

On vérifie :

$$f_{batt} = f_{antisym} - f_{sym}$$

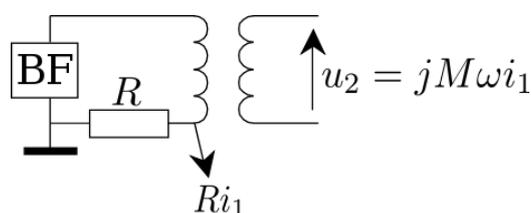
Les mesures de  $f_{antisym}$  et  $f_{sym}$  peuvent avoir été faites au curseur et celle de  $f_{batt}$  faite en ajustant (d'ailleurs, je pense qu'on a le temps de faire ces trois mesures devant le jury).

**Transition :** Ici, c'est l'écart en position angulaire des deux pendules qui implique le couplage. C'est donc un couplage élastique. On va maintenant étudier un couplage inertiel.

## 2 Couplage inertiel de deux circuits RLC

### Couplage par inductance mutuelle

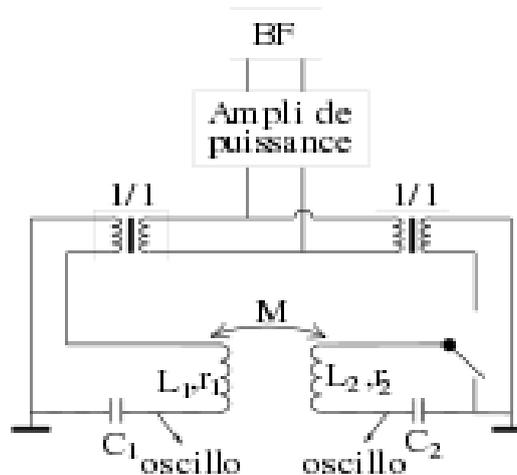
On fait rapidement une mesure de la dépendance de  $M$  avec la distance. Les bobines Leybold (voir leur choix plus loin) glissent le long d'une règle scotchée à la table et on mesure la mutuelle pour différentes distances  $d$  selon le montage :



Expérience : Il faut ajouter très rapidement un point devant le jury sinon les mesures qui suivent n'ont aucune valeur...

### Influence sur les oscillateurs

Bien expliquer le branchement du circuit, l'utilité des transfos d'isolement, et les deux positions de l'interrupteur.



Il faut déjà avoir  $L_1$  et  $L_2$  les plus grandes possibles, et les plus égales possibles car la théorie est développée dans le cas de la stricte égalité (on mesure les inductances et les résistances propres au RLC mètre). Régler  $C_1$  et  $C_2$  de sorte à avoir les fréquences propres  $f_0 = 1/\sqrt{LC}$  égales, de l'ordre de 10 kHz - à basse fréquence le facteur de qualité  $Q = L\omega_0/r$  est faible et à haute fréquence les pertes dans les bobines augmentent en  $\omega^2$ . On commence par étudier le couplage avec le circuit 2 en court-circuit.

Expérience : On montre l'influence du couplage. On excite le circuit 1, le circuit 2 est en court-circuit. On voit alors deux fréquences de résonance dont la séparation dépend du couplage (donc de la distance entre les deux bobines).

On excite ensuite les deux circuits en basculant l'interrupteur.

Expérience : Une unique fréquence de résonance apparaît : le mode symétrique ou antisymétrique (on obtient l'autre mode en inversant les bornes d'un des transfo). On peut alors regarder le régime transitoire (en envoyant un créneau) en couplage faible pour voir les battements. On peut enfin vérifier que  $f_{batt} = f_2 - f_1 = \theta f_0$  où  $\theta = M/\sqrt{L_1 L_2}$  est le coefficient de couplage, et  $M$  a été déterminée en préambule.

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

## 3 Influence du nombre d'oscillateurs couplés

On utilise la chaîne d'oscillateurs LC couplés, voir notice 40 - très détaillée. Il faut vraiment réfléchir ce montage électrique en terme de chaîne d'oscillateurs mécaniques pour bien comprendre :

- Selon l'endroit où on excite le circuit on n'excite pas les mêmes modes de vibration donc on fait plus ou moins bouger certains oscillateurs et pas les autres, mais les fréquences propres ne changent pas!
- A une excitation donnée on ne voit pas la même chose selon où on regarde : si on excite un mode qui laisse fixe un nœud et qu'on regarde justement ce nœud on ne voit rien alors que le système est bien excité!

Par contre, quelque soit l'excitation et où on regarde, les fréquences de résonance coïncident avec les fréquences propres du circuit et ne dépendent que du branchement du circuit, pas des points choisis pour l'excitation et l'observation! Donc si on veut bien comptabiliser les fréquences de résonance il faut exciter à un endroit (typiquement au milieu) et selon là où on regarde on en voit mieux certaines que d'autres! Ce raisonnement est surtout vrai pour les grands nombres d'oscillateurs couplés bien sûr.

**Conclusion :** On a mis en évidence des propriétés générales du couplage : l'apparition de mode de résonance dont les fréquences dépendent du couplage, et l'idée qu'en général la réponse est en fait une superposition de ces modes. Aussi, le fait que plus on couple d'oscillateurs plus on voit apparaître de fréquences différentes. Ouvrir sur le couplage d'un nombre infini d'oscillateurs (corde de Melde, Fabry-Perot, ...).

## MP n° 33 : Régimes transitoires.

**PLAN :** \_\_\_\_\_

1. Régime transitoire vers un état d'équilibre
2. Régime transitoire vers l'établissement d'un régime forcé
3. Régime transitoire d'un capteur : temps de réponse

**BIBLIOGRAPHIE :** \_\_\_\_\_

- [2] Quaranta IV.
- [25] *Supermanuel de Physique*, J. Majou et S. Komilikis.
- Polycopiés de TP Montrouge *Fluides et capillarité*, *Photorécepteurs* et *Résonance*.

**IDÉES À FAIRE PASSER :** \_\_\_\_\_

Les régimes transitoires peuvent apparaître dans différents cas de perturbation d'un état d'équilibre ou stationnaire. Plusieurs caractéristiques peuvent alors nous intéresser : stabilité, précision, rapidité...

**Introduction :** Il y a différents types de régimes transitoires que l'on va étudier dans ce montage : on part d'un état d'équilibre que l'on perturbe et on a un régime transitoire vers un nouvel état d'équilibre, on part d'un état d'équilibre et on force le système à en atteindre un autre, on veut faire une mesure auquel cas l'équilibre du capteur est en permanence perturbé et il est crucial de savoir s'il peut suivre ou non (mesure de temps de réponse).

### 1 Régime transitoire vers un état d'équilibre

L'interface initiale (Couche de glycérol sous une couche d'eau) n'est pas stable de sorte que, par diffusion du glycérol dans l'eau, le système va évoluer vers un état d'équilibre (homogène). On étudie l'évolution dans le temps de ce système qui est liée au coefficient de diffusion  $D$ .

Expérience : Diffusion du glycérol dans l'eau. Voir MP34.

**Transition :** Que se passe-t-il si l'état initial du système est stable et qu'on le perturbe? Comment le système évolue-t-il vers son nouvel état d'équilibre?

### 2 Régime transitoire vers l'établissement d'un régime forcé

La qualité (rapidité, précision, dépassement, ...) de la transition du système vers son nouvel état d'équilibre dépend de son facteur de qualité.

Expérience : (MP27) On envoie des crêteaux d'assez longue période dans un RLC dont on regarde la réponse en tension. Le facteur de qualité est directement lié à la valeur de  $R$  (cf. [25]). En faisant varier  $Q$  on peut observer les trois régimes pseudo-périodique, critique, et apériodique. Les montrer qualitativement et ajuster pour effectivement trouver  $Q$  et le comparer à la valeur déduite des composants (attention au  $R, L, C$  parasites éventuelles).

On peut aussi remarquer la forme exponentielle de l'enveloppe et estimer le temps d'établissement pour discuter de la rapidité du système. Voir éventuellement dans [25] ce qu'ils disent sur le portrait de phase. Je pense aussi qu'il peut-être intéressant de ne pas se contenter de la réponse à un échelon mais de regarder la réponse en RSF (cf. [25], encore).

**Transition :** Pour le transitoire du RLC le temps de réponse n'est pas une donnée critique, on sera probablement plus intéressé par son dépassement par exemple. En revanche, pour de nombreux systèmes servant de capteurs on a absolument besoin d'avoir un temps de réponse le plus court possible pour pouvoir suivre les variations rapide de la grandeur physique étudiée.

### 3 Régime transitoire d'un capteur : temps de réponse

Le capteur que l'on a choisi d'étudier est le thermopile de Moll car elle a un temps de réponse dû à l'établissement de l'équilibre thermique qui est par conséquent macroscopique donc facilement mesurable.

Expérience : Mesurer à l'oscilloscope le temps de réponse de la pile de Moll éclairée, par exemple, par un Quartz-iode.

**Conclusion :** On a étudié des régimes transitoires dont les durées s'étalent sur des ordres de grandeur assez différents (heure, seconde, et minute) et surtout liés à des forçage différents (établissement d'un état d'équilibre, forçage du système vers un nouvel état stationnaire, temps de réponse de capteur).

## MP n° 34 : Phénomènes de transport.

### PLAN :

---

1. Phénomène de transport sans support matériel, le rayonnement
2. Phénomènes de transport dans un milieu mais sans déplacement de matière, la conduction
3. Transport de matière, la diffusion de particule

### BIBLIOGRAPHIE :

---

- [3] Quaranta II, *thermodynamique* - pour le coefficient D du glycérol.
- [20] Garing, *Ondes mécanique et diffusion*.
- [23] Kittel, pour la loi de Wiedmann-Franz
- Composition 2002 (pour les calculs correspondant à l'expérience du glycérol)
- BUP n°819, pour la notice de la diffusion du glycérol.

### IDÉES À FAIRE PASSER :

---

Le but de ce montage est d'illustrer les phénomènes de transport dans leur diversité. D'une part, la diversité de l'objet transporté (particules, énergie, ...) et la diversité du mode de transport (diffusion, rayonnement, convection). De plus, l'étude des phénomènes de transport porte généralement sur deux régimes différents : le régime transitoire, et le régime stationnaire. Il faut insister chaque fois que c'est possible sur l'aspect transport des manip.

---

**Introduction :** Définir un phénomène de transport (cf. [3], p.460), présenter les différents types de transport qu'on peut rencontrer (idem, p. 461) et les grandeurs associées.

## 1 Phénomène de transport sans support matériel, le rayonnement

Exposer le principe de la manip, justifier notamment que le four puisse-t-être considéré comme un corps noir. Rappeler la loi de Stefan pour le rayonnement du corps noir. C'est elle que l'on va essayer de vérifier expérimentalement.

Expérience : Mettre en place la manipulation de rayonnement du corps noir tel que le flux reçu par la thermopile est directement lié à la température du corps qui a émis le rayonnement. Le four est alimenté via un transformateur 220/220 V de sorte que l'on peut régler la tension d'alimentation, et la thermopile est reliée à un nanovoltmètre (calibre le plus précis). A confirmer mais a priori le meilleur moyen de faire les mesures consiste à chauffer le four le plus possible (on atteint près de 600°C) et relever la température et le signal de la thermopile au cours du refroidissement du four. Prendre garde à faire circuler l'eau à un bon débit! Plus de détails sur l'interprétation des signaux quand j'aurais fait la manip... Ne pas oublier de mettre un thermocouple bien au fond du four!

**Remarque :** Cette version est la version classique de cette manip. Peut-être que dans ce montage, en vue de contourner la difficulté liée au fait qu'on ne retrouve jamais l'exposant 4, on peut fixer la température du four (équilibre thermique atteint) et éloigner la thermopile de l'orifice pour voir comment le rayonnement décroît... On n'a jamais essayé dans l'année mais ça peut peut-être être jouable.

---

**Transition :** Ce mode de transport, le rayonnement, se fait sans transport de matière. C'est un peu difficile à mettre en évidence dans cette expérience mais on peut assez simplement s'en convaincre si on comprend que c'est par rayonnement que l'énergie nous vient du soleil. Autre phénomène qui a lieu sans transport macroscopique de matière mais non sans support matériel c'est la conduction (thermique ou électrique).

---

## 2 Phénomènes de transport dans un milieu mais sans déplacement de matière, la conduction

On s'intéresse à la conduction thermique dans un barreau de cuivre. On commence par thermaliser le barreau puis on impose un gradient de température en chauffant une extrémité du barreau par effet Joule. On fait la mesure en régime permanent (évaluer le temps nécessaire pour l'atteindre - voir remarque plus bas sur le régime transitoire).

Expérience : Faire la mesure de conductivité thermique en régime permanent selon le protocole du MP17. Évoquer les pertes par rayonnement!

Remarque : Il y a, dans [19], un protocole de mesure en régime transitoire qu'on peut difficilement appliquer avec le dispositif de Montrouge du fait qu'on manque de capteur aux extrémités du barreau. A mon avis il ne faut pas se lancer dans la manip de Lyon le jour-J, mais on peut quand même relever les points en transitoire pour observer la progression  $L \approx \sqrt{T}$  qui est caractéristique de la conduction.

**Transition :** Quid alors des phénomènes de transport avec déplacement macroscopique de matière? C'est le cas notamment de la diffusion de particules! De plus, on a surtout évoqué jusque ici des phénomènes de transport en régime permanent (stationnaire) mais on va s'intéresser dans la partie suivante à un phénomène exclusivement transitoire.

### 3 Transport de matière, la diffusion de particule

Expérience : On présente devant le jury le montage, l'aspect optique et la loi physique attendue. Pendant ce temps on peut avoir relevé un ou deux points supplémentaires. Ajustement de l'angle de déviation en fonction du temps - détermination de  $D$  (à comparer à la valeur notice) mais le principal but de la manip est de vérifier la loi en  $\sqrt{t}$  caractéristique du transitoire de diffusion (ajuster la puissance pour voir l'écart à ladite loi). Si on veut que le  $\chi^2$  ait un sens il faut avoir minutieusement évalué les incertitudes!

Remarque :

- On peut projeter directement sur un mur, sur lequel on a scotché du papier millimétré. Le gros avantage c'est que, contrairement à l'écran, il ne risque pas de bouger!
- Le réglage est un peu compliqué à faire sans repère. Une solution est de laver correctement la burette (remplir d'éthanol pour dégraisser, puis d'eau pour rincer, puis de mélange eau-glycérol et vider une fois), puis de remplir la cuve d'eau/mélange : on voit où est le trait, on fait le réglage, et après « y a plus qu'à » relaver la cuve et la remplir parfaitement pour lancer l'expérience!

**Attention!** Le principe de la manip est décrit dans [3], ou dans le BUP, mais il faut corriger ce résultat d'un  $\overrightarrow{grad}(n)$  (voir [20]), sans oublier la réfraction à la sortie de la cuve. Penser à éclairer de biais avec la lentille cylindrique - D'ailleurs, réfléchir à comment fonctionne la lentille cylindrique...

Si on attend longtemps, la concentration va être totalement homogène et alors il n'y aura plus de transport : le régime limite, permanent, de cette expérience, est un état d'équilibre homogène.

Expérience : On peut d'ailleurs rapidement le mettre en évidence en agitant la cuve! Évoquer le fait qu'on force la **convection** pour accélérer le mélange.

**Conclusion :** Revenir sur la diversité des phénomènes de transport, ouvrir sur les comportements similaires (thermique/électrique - Loi de Wiedmann & Franz) et différents (métal/SC).

**BONUS :**

- Il y a tout une panoplie d'expériences qu'on peut mettre dans ce montage : rayonnement avec le four (modèle de corps noir), illustrer la convection par différents dispositifs, mesurer la conductivité thermique du cuivre par différentes méthodes, regarder l'influence de la température sur la conductivité électrique des métaux et des SC...
- Il faut prendre en compte, dans l'expérience du glycérol, le fait qu'on ne dépose pas le glycérol au fond de la cuve de manière homogène de sorte que l'interface eau/glycérol n'est pas, à l'instant initial, parfaitement horizontale. Le modèle décrit considère une telle interface plane à  $t = 0$  pour faire le calcul. Cet écart à l'idéalité se manifeste par un offset en temps : il faut ajuster en  $t - t_0$ .

# MP n° 35 : Moteurs.

**PLAN :** \_\_\_\_\_

1. Le moteur de Stirling
2. Les moteurs électriques

**BIBLIOGRAPHIE :** \_\_\_\_\_

- [11] HPrépa PSI/PSI\*, électronique II.
- [29] Niard, Machines électrique TF3.
- Polycopié de TP Montrouge *moteurs* & Poly de J. Neveu.

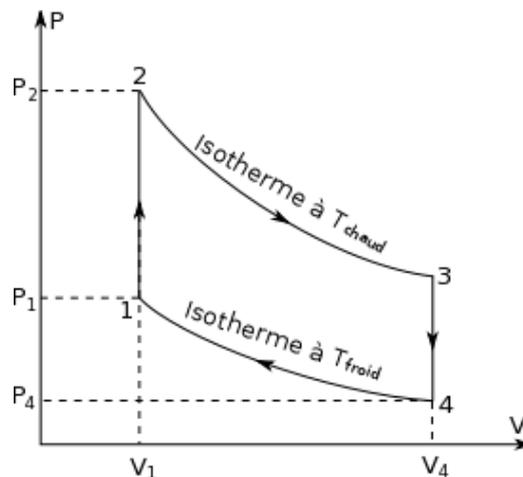
**IDÉES À FAIRE PASSER :** \_\_\_\_\_

Il y a deux grands types de moteurs qui se différencient par la source primaire d'énergie : les moteurs thermiques et les moteurs électriques.

**Introduction :** Moteurs = convertir une source d'énergie (chimique ou électrique) en énergie mécanique. On s'intéresse à trois choses : la vitesse ou le couple (selon ce qui importe) et le rendement!

## 1 Un moteur thermique : le moteur de Stirling

Présentation du moteur : transformation de l'énergie thermique en énergie électrique, description du cycle. Le cycle idéal est schématisé par :



Ici l'énergie fournie est liée à la masse d'alcool brûlée sachant que le pouvoir calorifique de l'alcool est de  $25 \text{ kJ.g}^{-1}$ , et la puissance produite est déduite de l'aire du cycle  $P(V)$  et de sa période. Décrire le montage expérimental pendant que le moteur tourne : brûleur, pressiomètre, potentiomètre qui mesure la position reliée à un pont diviseur de tension.

Expérience : Déterminer le rendement du moteur de Stirling en estimant la puissance fournie (par calcul) et la puissance utile en traçant le cycle  $(P,V)$  avec *interface V7* et en intégrant le cycle sous *Qtplot*. Peser le brûleur à alcool avant et après l'expérience (**ne pas oublier de chronométrer la totalité du temps où la flamme est allumée...**). On trouve à peu près  $0,5 \text{ W}$ , de l'ordre celle donnée par le constructeur qui est  $1 \text{ W}$ . On trouve pour rendement  $0,2 \%$ .

On peut comparer le rendement au rendement de Carnot ou à celui du cycle de Stirling idéal :

$$\eta_c = \frac{T_c - T_f}{T_c} \text{ et } \eta_s = \frac{T_c - T_f}{T_c + \frac{(T_c - T_f)C_{V,m}}{R \ln(V_4/V_1)}}$$

Discuter la différence entre le modèle et les pertes du moteur présenté. Voir la leçon sur les machines thermiques pour les raisonnements et calculs à ce sujet.

**Transition :** Le rendement est nul parce qu'on perd énormément en chaleur, mais il arrive qu'on ne puisse empêcher la perte d'énergie et que le moteur de Stirling soit un moyen d'en récupérer un peu... C'est mieux que rien! Comment on fait des moteurs avec de meilleurs rendements?

## 2 Les moteurs électriques

### 2.1 Le moteur à courant continu

Ça peut être seulement qualitatif (expliquer le principe de fonctionnement, les avantages et les inconvénients) et passer rapidement à la suite. On peut aussi faire une mesure de rendement. Problème : usure, donc coût d'entretien. Avantage : Courant continu = facile, et on a du couple en permanence!

### 2.2 Le moteur asynchrone

Voir [11], p. 114-121 et [29], pp. 168, 171 et 186 - Moteur asynchrone triphasé (alimentation synthétisée à partir du monophasé du secteur) couplé à un capteur de couple, un frein à poudre et une dynamo tachymétrique. Commencer par expliquer le principe du fonctionnement, puis explication des différents éléments de mesures :

- Le wattmètre donne la puissance injectée dans une des trois phases (à multiplier par trois, donc).
- Le capteur de couple renvoie une tension continue proportionnelle au couple développé par le moteur (20 Nm pour 5 V).
- Freinage magnétique : en imposant une tension continue à ses bornes on impose un couple de freinage proportionnel. C'est ce paramètre que l'on fait varier (entre 0 et 4 V). **Attention :** si elle n'est pas dans la caisse du moteur, penser à prendre une alimentation de puissance!
- Le tachymètre permet de remonter à la valeur de la vitesse de rotation grâce à une conversion immédiate de la tension continue à ses bornes : 10 V pour 1000 tr/min.

Expérience : On se met à la fréquence nominale de fonctionnement (50 Hz = **butée du bouton de réglage**, pour que ce soit reproductible) et on fait varier la tension de freinage sur un maximum d'amplitude et en prenant un maximum de points. On relève toutes les données possibles, et les incertitudes associées. On peut *éventuellement* faire un relevé à une autre fréquence de fonctionnement pour voir que c'est moins bien, mais il faut le faire avec précaution car les valeurs de la notice sont données par le constructeur pour la fréquence nominale de fonctionnement qui est 50 Hz.

On peut alors faire différentes exploitations :

- D'abord on ne peut couper à l'étude du rendement. La puissance fournie est la puissance électrique. La puissance utile est le produit du couple par la vitesse de rotation. Le rendement est le rapport des deux. On le trace en fonction de la puissance utile et on cherche le point de rendement maximal qui doit être comparé au point de fonctionnement nominal donné par le constructeur.
- On peut ensuite étudier le couple délivré par le moteur, et le tracer en fonction de la puissance utile (mais y a pas grand chose à dire de plus...)
- on peut constater que la vitesse de rotation varie : c'est un des inconvénients du moteur asynchrone.
- On peut tracer le couple en fonction du glissement. Le glissement est l'écart relatif entre la vitesse du champ tournant (25 Hz soit 1500 tr/min ici car on alimente en 50 Hz et on a deux paires de pôles) et celle du rotor. Voir interprétation dans le poly de J. Neuveu, p. 29.

**Conclusion :** On a un bien meilleur rendement qu'avec le moteur de Stirling. En fait les moteurs thermiques sont quand même très utilisés dans leur version évoluée avec combustion interne (moteur de voiture) car l'énergie est bien plus facile à transporter!

# Bibliographie

- [1] G. Asch and coll. *Les capteurs en instrumentation industrielle*. Dunod, 2006.
- [2] D. Aubert and L. Quanranta. *Dictionnaire de physique expérimentale*, volume Tome IV, L'électricité. Pierron, 1992.
- [3] D. Aubert and L. Quanranta. *Dictionnaire de physique expérimentale*, volume Tome II, La thermodynamique. Pierron, 1992.
- [4] D. Aubert and L. Quanranta. *Dictionnaire de physique expérimentale*, volume Tome III, L'électronique. Pierron, 1992.
- [5] M. Bertin, J.P. Faroux, and J. Renault. *Electromagnétisme 4 : milieux diélectriques et milieux aimantés*. Dunod, 1984.
- [6] M. Bertin, J.P. Faroux, and J. Renault. *Mécanique 2* : Dunod, 1984.
- [7] J. Berty, B. Fagot, and L. Martin. *Electricité pratique*, volume Tome 1 : courant continu. Vuibert, 1985.
- [8] L. Bocquet, J.-P. Faroux, and J. Renault. *Toute la mécanique*. Dunod, 2002.
- [9] P. Bousquet. *Spéctroscopie instrumentale*. Dunod, 1969.
- [10] P. Brasselet. *Mécanique. PCSI - MPSI*. Presses Universitaires de France, 2000.
- [11] J.-M. Brébec. volume II. Hachette, 1997.
- [12] J.-M. Brébec. *Ondes. 2nde année PC-PC\*, PSI-PSI\**. Hachette Supérieur, 1997.
- [13] F. Cottet. *Traitement des signaux et acquisition des données*. Dunod, 1997.
- [14] P.-G. de Gennes, F. Brochard-Wyart, and D. Quéré. *Gouttes, bulles, perles et ondes*. Belin, 2002.
- [15] E. du Trémolet de la Lacheisserie. *Magnétisme*, volume I - Fondements. EDP Sciences, 2000.
- [16] R. Duffait. *Expériences d'Optique*. Bréal, 1997.
- [17] R. Duffait and Lievre J.-P. *Expériences d'électronique*. Bréal, 1999.
- [18] P. Fleury and J.-P. Mathieu. volume Electrostatique. Courants continus. Magnétisme. Eyrolles, 1960.
- [19] M Fruchart, P. Lidon, E. Thibierge, M Champion, and A. Le Diffon. *Physique expérimentale. Optique, mécanique des fluides, ondes et thermodynamique*. De Boeck, 2016.
- [20] C. Garing. *Ondes mécaniques et diffusion*. Ellipses, 1998.
- [21] E. Guyon, J.-P. Hulin, and L. Petit. *Hydrodynamique Physique*. EDP Sciences, 2001.
- [22] S. Houard. *Optique. Une approche expérimentale et pratique*. De Boeck, 2011.
- [23] C. Kittel. *Physique de l'état solide*. Dunod, 1998.
- [24] M. Krob. *Electronique expérimentale*. Ellipses, 2002.
- [25] J. Majou and S. Komilikis. *Supermanuel de Physique. Tout-en-un MPSI/PCSI/PTSI*. Bréal, 2013.
- [26] A. Malvino. *Principes d'électronique*. McGraw-Hill, 1988.
- [27] D. Mauras. *Électromagnétisme. 2e année*. Presses Universitaires de France, 1999.
- [28] D. Mauras. *Optique Physique, et électronique*. Presses Universitaires de France, 2001.
- [29] J. Niard, R. Moreau, and J. Battut. Nathan Technique, 1985.
- [30] J.-P. Pellegrin. Étude théorique du transistor bipolaire et du transistor à effet de champ. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 571 :503 – 533, 1975.
- [31] J.P. Pérez. *Mécanique*. 1990.
- [32] J.P. Pérez. *Optique*. 1990.
- [33] L. Quanranta. *Dictionnaire de physique expérimentale*, volume Tome I, La mécanique. Pierron, 1986.
- [34] Sextant. *Optique Expérimentale*. Hermann, 1997.