

MP 01 : Quantité de mouvement, moment cinétique et énergie en mécanique classique.

Bibliographie :

- Pérez, Mécanique
- Quaranta tome 1
- Duffait CAPES

Plan :

Intro : mise en application des différents principes vus en mécanique (PDF, TMC, énergie mécanique, etc.)

I) Étude de la quantité de mouvement

- 1) Conservation de la quantité de mouvement pour un système pseudo isolé → choc élastique avec les mobiles autoporteurs de masses différentes (lancer le mobile lourd plus vite que le mobile léger pour avoir quelque chose de bien visible), en profiter pour montrer la conservation de l'énergie cinétique totale avec l'hypothèse du choc élastique.
- 2) Principe fondamental de la dynamique sur l'exemple simple de la chute libre → mesure de l'accélération de la pesanteur, tracer la distance de chute en fonction du temps de chute, retrouver une parabole et g (ne pas faire l'étude énergétique)

II) Étude du moment cinétique

- 1) Mouvement à force centrale conservative → mobile autoporteur, relié à un point fixe par un ressort de constante de raideur connue, vérification de la loi des aires, faire de la conservation de l'énergie mécanique (on peut tracer E_c en fonction de $\frac{1}{2}(L-L_0)^2$ pour remonter à la constante de raideur du ressort qu'on peut comparer à celle mesurée en préparation au Newtonmètre)
- 2) Pendule pesant → prendre le pendule (celui des pendules couplés) qu'on équilibre statiquement, rajouter une masse, écrire le théorème du moment cinétique, mesurer la fréquence des battements, mesure de I , faire l'étude énergétique en traçant E_c , E_{pot} et E_m en fonction de t .

Conclusion : illustrations des lois de la mécanique, qui couvrent bien évidemment une immense gamme d'applications (tant qu'on reste dans le domaine non relativiste) du mouvement des planètes aux machines industrielles.

MP 02 : Phénomènes de surface.

Bibliographie :

- Quaranta tome 1 (« capillarité »)
- Physique tout en un PC-PC* Dunod (pour le stick-slip)
- Gouttes, perles et ondes
- Guyon Hulin Petit

Plan :

Intro : évocation des phénomènes de surface dans la vie de tous les jours (armoire plus difficile à pousser au départ qu'une fois lancée, gouttes sur les nénuphars ou dans la poêle par rapport à eau sur du verre, formation de gouttelettes à partir d'un filet d'eau).

I) Frottement solide

- 1) Stick-slip → rappeler les lois de Coulomb, présenter le mouvement attendu, montrer la réalisation expérimentale avec VIDEOCOM (en suivant un mobile sur de la mousse, attaché par un ressort, sur la table traçante défilante, ou dans le couloir prévu à cet effet), calculer μ_d et μ_s à partir des périodes de glissement et de collage.

II) La tension superficielle

- 1) Mise en évidence qualitative → minimisation de la surface d'un film de savon sur un support métallique (selle de cheval), ou en crevant une partie d'un film séparé par une ficelle.
- 2) Mesure de la tension de surface de l'eau → balance d'arrachement (ou anneau attaché à un dynamomètre, plus immédiat, même précision), montrer que l'ajout de tensioactifs réduit la tension de surface.
- 3) Une conséquence : montée capillaire → tubes de Jurin, tracer la hauteur d'éthanol en fonction du rayon du tube (attention, bien faire monter l'éthanol en plongeant les tubes dans le récipient et laisser redescendre jusqu'à la hauteur capillaire)
- 4) Une mesure dynamique de tension de surface → relation de dispersion des ondes gravito-capillaires

III) Mouillage d'une surface, interface entre 3 milieux (gaz, liquide, solide)

- 1) Mise en évidence de l'existence d'un angle de mouillage → projection sur le mur de gouttes d'eau ou d'éthanol sur différentes surfaces solides.
- 2) Mise en évidence de l'hystérésis de l'angle de contact (mouillage et démouillage) → même manip mais en injectant ou en pompant du liquide à la goutte via une seringue.

Conclusion : ouverture sur tous les problèmes de tribologie, de recherche sur les micelles (tensio-actifs) et sur les surfaces super-hydrophobes.

MP 03 : Dynamique des fluides.

Bibliographie :

- Quaranta tome 1
- Guyon Hulin Petit

Plan :

Intro : placer le cadre de l'étude, fluide newtonien, écoulement incompressible ($v \ll C_{son}$), rappeler l'intérêt du nombre de Reynolds. On va s'intéresser à différents domaines de dynamique des fluides.

I) Écoulements laminaires

- 1) Mesure de viscosité → viscosimètre à bille et force de Stokes (remonter à la viscosité dynamique de l'eau), bien discuter la vérification des hypothèses de travail (en particulier calculer Re , vérifier que le temps d'établissement de la vitesse limite est faible, et vérifier que la distance aux parois est suffisamment grande devant la taille de la bille pour négliger les effets de bord).
- 2) Loi de Poiseuille → écoulement de Poiseuille dans un tube capillaire, tracer le débit en fonction de la différence de pression, éventuellement tracer le débit en fonction de la longueur du capillaire ou de la section du capillaire, bien vérifier que la distance d'établissement de l'écoulement de Poiseuille est petite devant la taille du tube.

II) Écoulements inertiels

- 1) Théorème de Bernouilli → vérification à l'aide de la soufflerie et du tube de Pitot (mesure de v à l'anémomètre à fil chaud).
- 2) Force de traînée → toujours avec la soufflerie, tracer F en fonction de v^2 (à obstacle fixé), montrer la dépendance en la surface de l'obstacle (à v fixé et à forme de l'obstacle fixé), enfin montrer qualitativement que le coefficient de traînée dépend de la forme de l'obstacle.

Conclusion : ouverture sur les problèmes de profilage pour les avions, les casques de cyclistes.

MP 04 : Thermométrie.

Bibliographie :

- Quaranta tome 2
- BFR Thermodynamique
- Duffait CAPES

Plan :

Introduction sur les différentes techniques de mesure de la température (thermomètre primaire, et secondaire) et sur les différentes caractéristiques des capteurs de température (sensibilité, linéarité, temps de réponse), rappeler l'importance d'avoir une faible capacité calorifique pour ne pas perturber le milieu dont on veut mesurer la température.

I) Un thermomètre primaire : le tube de Kundt

- 1) Principe de la mesure, tracé de la droite C_{son} en fonction de T, bien dire que ça repose sur la loi des gaz parfaits (idem thermomètre à gaz).

II) Comparaison de différents thermomètres secondaires

- 1) Nécessité d'un étalonnage, existence des points fixes → principe de fonctionnement et étalonnage d'une sonde Pt100 (thermistance, branchée en montage 4 fils), obtention des coefficients de l'expression polynomiale de $R(T)$, montrer l'influence du courant qui circule dans la sonde (augmenter le courant jusqu'à voir une variation de R mesuré à température fixe, dans ce cas le courant est trop grand et chauffe la thermistance, NB : 10 mA est déjà beaucoup).
- 2) Présentation d'autres thermomètres secondaires → thermistance CTN (R diminue avec T), thermocouple (effet Seebeck, différence de tension entre deux métaux à deux températures différentes), thermomètre à alcool (dilatation d'un liquide avec la température), montrer les lois de la grandeur mesurée en fonction de la température (se servir de la Pt100 comme référence).
- 3) Etude de la linéarité des capteurs (dans une gamme de température « raisonnable »)
- 4) Comparaison de la sensibilité ($\frac{1}{X} \frac{dX}{dT}$) des capteurs
- 5) Comparaison du temps de réponse des capteurs

III) Un autre exemple de thermomètre pour une gamme de température plus élevée

- 1) Le pyromètre optique, principe de fonctionnement, mesure de la température du filament d'une lampe, loi du corps noir (puissance en T^4).

Conclusion : ouverture sur le fait qu'il est nécessaire d'être à l'équilibre thermique, car à part pour le pyromètre optique, les thermomètres secondaires donnent leur température et pas celle du milieu dans lequel ils sont plongés.

MP 05 : Transitions de phases.

Bibliographie :

- Quaranta tome 2
- JFLM tome 1
- Diu Thermo
- Papon Physique des transitions de phase

Plan :

Introduction sur les transitions de phase dans la vie quotidienne, la classification d'Ehrenfest.

- I) Un exemple de transition du 1^{er} ordre
 - 1) Transition liquide/gaz → isotherme d'Andrews avec SF₆ (bien discuter la discontinuité de volume massique et les différentes régions, parler de la variance).
 - 2) Une détermination de chaleur latente → utilisation de la formule de Clapeyron à partir des isothermes précédentes
 - 3) Un autre exemple : transformation allotropique → recalescence du Fer, bien dire qu'on a également une discontinuité de volume massique.
- II) Mesures de chaleur latente
 - 1) Chaleur latente de fusion de la glace → mesure avec un Dewar (ne pas s'éterniser sur la masse équivalente en eau du Dewar, qui sera de toute façon négligeable devant les masses introduites, bien sécher la glace qu'on introduit)
 - 2) Chaleur latente de vaporisation de l'azote → mesure avec un Dewar et une résistance chauffante à partir de la masse perdue, bien discuter les incertitudes, en particulier l'erreur due à la vaporisation « naturelle » de l'azote liquide (mesurer la dérive de masse en fonction du temps sans résistance chauffante).
- III) Autres propriétés des transitions
 - 1) Métastabilité → surfusion de l'étain (ne pas oublier de dire qu'il s'agit ici toujours d'une transition du 1^{er} ordre).
 - 2) Opalescence critique → avec SF₆ (bien montrer le point critique sur les isothermes d'Andrews, décrire le phénomène, dire que la transition est ici d'ordre 2).
 - 3) Transition ferro/para → mesure de la température de transition du fer, ne pas oublier de mentionner que la transition est théoriquement du 2nd ordre en champ nul alors qu'on met un aimant ici.

Conclusion : ouverture sur les applications dans les machines thermiques.

MP 06 : Instrument(s) d'optique.

Bibliographie :

- Duffait
- Dettwiller, Qu'est-ce que l'optique géométrique
- Houard, Optique

Plan :

Introduction sur les différents instruments d'optiques inventés dans différents buts, définition des « caractéristiques » des instruments que nous allons illustrer sur un exemple : la lunette astronomique.

I) Présentation du montage

- 1) Créer un objet à l'infini, créer un œil qui fait l'image d'un objet à l'infini sur un écran, intercaler la lunette, faire une remarque sur le sens de l'image.

II) Mesure du grossissement

- 1) Vérification de la loi du grossissement (égal au grandissement angulaire dans ce cas particulier) pour différents couples de lentilles formant la lunette astronomique.

III) Diaphragmes d'ouverture et de champ

- 1) Mettre en évidence le rôle du diaphragme d'ouverture, montrer le cercle oculaire, vérifier l'autre formule du grossissement en fonction du diamètre du diaphragme d'ouverture et du cercle oculaire, placer l'œil au cercle oculaire.
- 2) Mettre en évidence le rôle du diaphragme de champ, montrer le vignettage, le placer à l'image intermédiaire pour faire disparaître le vignettage, montrer le rôle du verre de champ.

IV) Pouvoir de résolution

- 1) Faire l'expérience « Michel Farizon », avec Caliens, un jeu de bifentes d'épaisseur différentes, et une unique lentille (bien dire qu'on illustre le principe sur un dispositif plus simple que la lentille, mais que ça ne change rien fondamentalement), montrer d'abord la limitation due au « grain » du récepteur, puis le critère de Rayleigh dû à la diffraction en rajoutant une fente réglable.

V) Clarté

- 1) Vérification de la loi de la clarté pour des objets étendus, calcul du taux de transmission de la lunette.

Conclusion : montrer une vraie lunette, parler des compromis à faire (notamment sur les tailles des lentilles, dont les montures joueront le rôle des diaphragmes).

MP 07 : Interférences à deux ondes : conditions d'obtention.

Bibliographie :

- Duffait
- Sextant

Plan :

Intro : rappel de la définition d'interférence, rappel des conditions théoriques d'interférence (source unique, ponctuelle et monochromatique), nous nous intéressons maintenant aux conditions réelles d'obtention.

I) Cohérence spatiale de la source

- 1) Expérience des fentes d'Young avec Caliens et le tube de sopalin (QI+filtre interférentiel). En changeant d la distance fente source/fentes d'Young, on peut brouiller les interférences (si les 2 fentes ne sont plus dans le cône de diffraction de la fente source). On trace le contraste en fonction de d . On observe l'inversion de contraste (rebond du sinus cardinal), on mesure l'angle de cohérence spatiale de la source.
- 2) Montrer le changement de la figure d'interférence quand on change la longueur d'onde incidente. Expliquer alors pourquoi on a un brouillage en lumière blanche, enchaîner sur la cohérence temporelle (et dire qu'on va utiliser un Michelson pour s'affranchir de la cohérence spatiale).

II) Influence du contenu spectral de la source

- 1) Commencer par rappeler qu'on est passé d'un dispositif de division du front d'onde à un dispositif de division d'amplitude, qui va nous permettre d'avoir un meilleur contraste, au prix de la localisation des figures d'interférence.
- 2) Illustration du principe (le contraste est la TF de la distribution spectrale de la source) avec la lampe au sodium, montrer les battements, mesurer $\Delta\lambda$
- 3) Mesure de la largeur de raie du mercure (éventuellement le faire par spectroscopie par TF, mais à la main ça va aussi).

III) Modèle scalaire de la lumière

- 1) Expérience de type Fresnel-Arago avec un laser, un jeu de miroirs et des polariseurs (penser à faire passer la superposition finale des faisceaux laser dans une tête de microscope pour avoir une image visible sur un écran), montrer que deux ondes polarisées orthogonalement l'interfèrent pas entre elles.

Conclusion : revenir sur les deux cohérences, temporelle (intrinsèque à la source) et spatiale (due à la façon dont le dispositif voit une source étendue), et sur les façons de les éviter (division d'amplitude et filtres interférentiels).

MP 08 : Diffraction des ondes lumineuses.

Bibliographie :

- Duffait
- Sextant
- Bruhat, Optique

Plan :

Intro : rappel des conditions dans lesquelles un faisceau lumineux diffracte.

I) Diffraction de Fresnel

- 1) Diffraction de Fresnel par une pupille circulaire, avec un laser vert, montrer les figures obtenues et vérifier la loi attendue. Ne surtout pas toucher au montage une fois qu'il est réglé.
- 2) De Fresnel à Fraunhofer, rappeler rapidement le développement des termes dans l'exponentielle (cf. Sextant) et montrer qu'on est en Fraunhofer approché lorsqu'on regarde la diffraction dans le plan de l'image conjuguée de la source (le faire).

II) Diffraction de Fraunhofer

- 1) Montrer la figure de diffraction par un objet. Bien dire qu'on a la transformée de Fourier de la fonction de transfert de l'objet diffractant (le montrer). On peut changer de longueur d'onde pour montrer le changement de la figure avec un même objet diffractant (et changer d'objet diffractant avec une même longueur d'onde, dans ce cas, tracer la largeur de la tache en fonction de l'inverse de la largeur de l'objet diffractant).
- 2) Montrer les propriétés dues à la TF : théorème de Babinet, translation possible de l'objet diffractant sans changement de la figure de diffraction.

III) Application au filtrage spatial

- 1) Faire l'expérience d'Abbe (filtrage spatial) en lumière blanche avec une grille comme objet.

IV) Application à la résolution des instruments d'optique

- 1) Faire l'expérience « Michel Farizon » pour montrer le critère de Rayleigh.

Conclusion : revenir sur le fait que la diffraction n'est pas toujours gênante, en particulier elle est nécessaire pour observer les interférences avec des trous d'Young et elle sert également pour les réseaux.

MP 09 : Spectrométrie optique.

Bibliographie :

- Duffait
- Sextant

Plan :

Intro : rappeler le but et le principe de la spectroscopie, nommer les deux types de dispositifs (interférentiel et dispersif) + manip introductive avec un simple prisme à vision directe pour montrer le spectre de la lumière blanche.

I) Un dispositif dispersif : le réseau

- 1) Étalonner un réseau avec une lampe à Hg, s'en servir pour mesurer les longueurs d'onde des raies d'une lampe à Na. Montrer que la loi est linéaire (on ne regarde que le premier ordre, distance à l'ordre 0 proportionnelle à la longueur d'onde).
- 2) Pouvoir de résolution. Montrer l'influence de la taille de la fente source (si elle est trop large, on superpose différentes raies). Montrer l'influence du nombre de traits éclairés (résolution en $N \cdot k$ où N est le nombre de traits éclairés et k l'ordre qu'on regarde). Montrer qu'on ne peut pas résoudre ici le doublet du sodium.
- 3) Éventuellement, montrer le spectromètre commercial à réseau qui peut s'ouvrir pour montrer le dispositif interne.

II) Un dispositif interférentiel : Michelson

- 1) Mesurer le doublet de la lampe à Na en mesurant la distance entre les battements observés en lame d'air (ne pas oublier de conclure qu'on a une meilleure résolution qu'avec le réseau précédent).
- 2) Spectrométrie par transformée de Fourier : le principe est le même que précédemment, le faire avec une lampe à Hg, avec synchronie et une photodiode commerciale, ne pas oublier que la réponse de la photodiode n'est pas forcément plate non plus, discuter la forme de la distribution spectrale obtenue.

III) Mesure des modes d'un laser avec une cavité Fabry-Pérot

- 1) Montrer les modes du laser, discuter la finesse de la cavité Fabry Pérot (notamment pour mesurer la largeur des modes).

Conclusion : ouverture sur les intérêts pour l'étude des propriétés atomiques, pour l'astrophysique (analyse à distance de la composition d'une étoile), pour vérifier qu'un laser est mono-mode, etc.

MP 10 : Milieux optiquement actifs : biréfringence et pouvoir rotatoire.

Bibliographie :

- Duffait
- Sextant
- JFLM tome 2

Plan :

Introduction sur le fait qu'on travaille en général avec des milieux homogènes, isotropes, linéaires, ici on va perdre le caractère isotrope, à cause de la structure cristalline des matériaux étudiés.

I) Biréfringence

- 1) Mise en évidence à l'aide du rhomboèdre, éclairer le rhomboèdre avec une QI, montrer qu'on a deux images, que l'une « tourne » autour de l'autre si on tourne le rhomboèdre, et que les deux sont polarisées orthogonalement et dans le sens prédit par la théorie si on s'arrange pour placer l'axe optique du rhomboèdre dans le plan contenant les rayons lumineux.
- 2) Mesure de la biréfringence d'une lame « épaisse » de Quartz (taillée parallèlement à l'axe optique) entre polariseur et analyseur croisés, montrer au prisme à vision direct qu'on a un spectre cannelé en sortie du Quartz, mesure avec Spid HR l'interfrange et remonter à la différence d'indice entre les directions ordinaire et extraordinaire.
- 3) Mesure de l'épaisseur d'une lame « mince » de Quartz (taillée parallèlement à l'axe optique) avec l'utilisation d'un compensateur de Babinet. D'abord expliquer l'étalonnage du compensateur, montrer les couleurs observées avec la lame entre polariseurs et analyseurs croisés, remonter à la différence de marche qu'elle introduit entre les deux polarisations à l'aide du compensateur, en déduire l'épaisseur de lame (connaissant le Δn mesuré auparavant). On peut également montrer le signal obtenu sans le compensateur au PVD.
- 4) Biréfringence provoquée (éventuellement) : mettre une touillette à café à la place de la lame, montrer qu'on voit des effets de biréfringence qui sont dues aux contraintes qu'elle a subi lorsqu'elle a été fabriquée.

II) Polarisation rotatoire

- 1) Mise en évidence. Mettre une cuve avec une solution de glucose (un seul énantiomère), entre polariseur et analyseur croisés, montrer la polarisation rotatoire. Montrer qu'elle dépend de la concentration de la solution de glucose.
- 2) Dispersion rotatoire du Quartz. Bien penser à dire qu'on prend cette fois des lames de Quartz taillées perpendiculairement à l'axe optique, pour ne pas être gêné par la biréfringence et ne voir que l'effet de la polarisation rotatoire. Montrer que la polarisation tourne d'un angle qui dépend de la longueur d'onde.
- 3) Polarisation par effet Faraday, mesurer l'angle dont tourne la polarisation en sortie d'un barreau de Flint dans un champ magnétique, en fonction du champ magnétique appliqué.

Conclusion : ouverture sur l'optique non linéaire.

MP 11 : Production et analyse de lumière polarisée.

Bibliographie :

- Duffait
- Sextant

Plan :

Introduction sur le fait qu'on peut souvent se contenter du modèle scalaire de la lumière, mais qu'il ne faut pas oublier qu'il s'agit d'une grandeur vectorielle et que la polarisation est importante pour expliquer certains phénomènes.

I) Polarisation rectiligne et elliptique, outils de base

- 1) Polariseur : vérification de la loi de Malus (à la photodiode)
- 2) lame quart d'onde, création d'une polarisation elliptique (ou circulaire) à partir d'une polarisation rectiligne, nécessité de se mettre en lumière quasi-monochromatique (filtre interférentiel) dont la longueur d'onde correspond à celle de la quart d'onde.
- 3) Méthode générale d'analyse d'une polarisation inconnue.

II) Production de lumière polarisée par réflexion/transmission

- 1) Réflexion sur un diélectrique (du verre), incidence de Brewster : pour l'une des deux polarisations rectilignes, il y a toujours réflexion et transmission, pour la seconde il existe un angle ($\sim 57^\circ$) pour lequel il n'y a que transmission. Trouver l'angle de Brewster en éteignant la réflexion (en envoyant uniquement la polarisation qui peut s'éteindre), à la photodiode ou à l'œil.
- 2) Transmission par un diélectrique, à l'incidence de Brewster, on récupère en sortie une onde partiellement polarisée rectilignement, le montrer, mesurer le taux de polarisation ($\sim 16\%$).
- 3) Réflexion sur un conducteur métallique, dans de bonnes conditions, on récupère une polarisation elliptique à partir d'une polarisation rectiligne, le montrer (peut-être plus facile à l'œil qu'à la photodiode).

III) Autres productions de lumière polarisée

- 1) Cristal biréfringent : rhomboèdre de quartz, montrer qu'on envoie une onde non polarisée et qu'on récupère en sortie deux faisceaux polarisés rectilignement (orthogonaux l'un de l'autre) qui sont en plus séparés spatialement.
- 2) Diffusion Rayleigh : expérience de la cuve à eau avec quelques gouttes de lait entier. Montrer la polarisation de la lumière réémise selon la polarisation de la lumière incidente.

Conclusion : ouverture sur les applications (lunettes de cinéma 3D, filtres anti-reflets, etc.).

MP 12 : Emission et absorption dans le domaine optique.

Bibliographie :

- Sextant
- Quaranta II
- Cagnac
- JFLM tome 1

Plan :

Introduction sur les différents types d'absorption et d'émission que nous allons étudier dans ce montage.

I) Émission spontanée

- 1) Mesure de la série de Balmer au spectromètre ULICE (logiciel Spid HR), on mesure les transitions vers le niveau 2, remonter à la constante de Rydberg.
- 2) Estimation de la largeur spectrale d'une raie de Hg à l'aide d'un Michelson, remonter à la longueur de cohérence.

II) Émission stimulée

- 1) Spectre dans une cavité laser, montrer le spectre mesuré avec Ulice dans la cavité du laser transparent.
- 2) Même mesure dans le faisceau laser, cette fois on a beaucoup moins de raies, conclure sur la sélectivité spectrale et donc la cohérence temporelle des sources laser. On a éventuellement besoin de mettre un polariseur/analyseur pour atténuer l'intensité du faisceau.

III) Absorption : loi de Beer-Lambert

- 1) Illustration du principe, faire le blanc avec de l'eau distillée, puis faire le spectre d'une solution de permanganate de potassium pour trouver la longueur d'onde à laquelle on va mesurer l'absorbance.
- 2) Montrer la dépendance en la longueur de la cuve et en la concentration de la solution, remonter au coefficient d'extinction molaire.

IV) Emission du corps noir : loi de Stefan

- 1) Mesure de la loi de Stefan au pyromètre optique avec une lampe de Tungstène.

Conclusion : utilité de tous ces phénomènes dans plein d'applications (mesure de concentration, création de faisceaux monochromatiques intenses), nécessité de les connaître pour tous les protocoles qui utilisent des sources de lumière.

MP 13 : Lasers.

Bibliographie :

- Dangoisse, Les lasers
- Les lasers et leurs applications, Detwiler
- Sextant
- Duffait (Speckle)

Plan :

Introduction rapidement historique sur l'invention du laser, descriptif des propriétés par rapport aux sources « traditionnelles » de lumière (grande directivité, faisceau focalisé donc intensité importante, forte monochromaticité, grande cohérence spatiale)

I) Principe de fonctionnement d'un laser, cohérence

- 1) Principe de fonctionnement avec le laser transparent → montrer avec Ulice (et SpidHR) qu'il y a plusieurs longueurs d'ondes si on regarde « dans » le laser, et beaucoup moins en sortie, prendre ensuite la cavité Fabry-Pérot confocale pour discuter la sélection des modes, le profil gaussien dû à l'effet Doppler, et la finesse de la cavité laser (attention à comparer à la finesse de la cavité de mesure)
- 2) Cohérence temporelle → calculer la largeur spectrale du laser à partir des mesures précédentes, en déduire la longueur de cohérence temporelle.
- 3) Cohérence spatiale → le Speckle (le faire avec un laser vert).

II) Propriétés géométriques du faisceau

- 1) Profil gaussien → mesurer le profil avec Caliens, exporter vers Regressi, faire un fit gaussien (attention à l'alignement du laser, c'est la grosse difficulté de cette partie)
- 2) Mesure du waist → faire un ajustement gaussien pour obtenir le waist du faisceau à une certaine distance du laser, faire la mesure à différentes distances (bien penser à partir le plus près possible du laser, et à s'éloigner autant que possible sans que le signal devienne trop moche), montrer la loi attendue du waist en fonction de la distance.
- 3) Comparaison avec une diode laser → montrer que cette fois le profil n'est pas gaussien

III) Puissance du laser (si temps)

- 1) Mesure à l'aide d'une thermopile la puissance d'un faisceau laser (comparer à la valeur indiquée sur le laser), bien penser à ne pas trop rapprocher la thermopile du laser, sinon le fait que ce dernier chauffe (à cause de l'alimentation) va perturber la mesure, prendre un voltmètre de précision pour la thermopile.

Conclusion : ouverture sur toutes les applications des lasers (télémétrie, médical, optique non linéaire, etc).

MP 14 : Photorécepteurs.

Bibliographie :

- Sextant
- Duffait
- BUP 70

Plan :

Introduction sur l'usage fréquent de photorécepteurs, ce sont des capteurs qui transforment en général un flux lumineux en signal électrique. Distinction entre récepteurs photoniques et thermiques.

I) Caractéristiques, linéarité, sensibilité

- 1) Principe de polarisation d'une photodiode, tracé de la caractéristique.
- 2) Vérification de la loi de Malus avec une photodiode éclairée par une diode laser (un laser est en général trop instable, et une QI ne permet pas de calculer la sensibilité), calcul de la sensibilité en mesurant le flux au puissance-mètre commercial (spécial laser).
- 3) Principe de fonctionnement d'une photorésistance, tracé de la caractéristique, tracé de la loi de Malus (mesure à l'ohmmètre), bien dire qu'ici la sensibilité définie à partir du courant électrique n'a pas de sens puisque le courant dépendra du générateur que l'on branche sur la résistance.
- 4) Tableau comparatif des deux photodétecteurs.

II) Réponse spectrale de la photodiode

- 1) Tracé de la réponse spectrale, en lumière blanche, avec des filtres interférentiels, en normalisant par le signal obtenu à l'aide d'une thermopile (réponse plate). En profiter pour donner certaines caractéristiques de la thermopile (notamment son temps de réponse très lent, dû à la thermalisation thermique).

III) Temps de réponse et applications

- 1) Montrer le temps de réponse (temps de relaxation en fait), de la photodiode et de la photorésistance en utilisant un stroboscope comme source.
- 2) Application à l'allumage de l'éclairage urbain (détecteur de luminosité), réaliser un circuit avec une ampoule et une alimentation, qui est fermé par un relais lui-même commandé par un circuit comprenant une photorésistance et un générateur (il basculera lorsque la résistance sera suffisamment grande, i.e. lorsque que l'éclairage sera suffisamment faible).

Conclusion : sur les différents facteurs à prendre en compte et les compromis à trouver pour utiliser le meilleur photorécepteur pour un usage défini.

MP 15 : Production et mesure de champs magnétiques.

Bibliographie :

- Quaranta IV
- Précis Bréal Electrotechnique
- Aschroft ou Grécias PCSI (effet Hall)
- BFR électromagnétisme 2, Garing magnétisme

Plan :

Introduction rapidement historique sur les aimants, le champ magnétique terrestre, etc.

I) Mesure de champs magnétiques

- 1) Fluxmètre, expliquer le principe, faire une mesure dans l'électro-aimant, bire qu'on a uniquement une mesure différentielle, et qu'on moyenne sur la surface de la spire.
- 2) Teslamètre, expliquer le principe qui repose sur l'effet Hall, expliquer l'importance de retourner la plaque pour pouvoir annuler l'incertitude due aux soudures, faire la courbe d'étalonnage de l'électro-aimant en comparant au teslamètre commercial, remonter à la densité de porteur dans le semi-conducteur. Dire qu'on peut avoir une mesure plus localisée mais qu'on ne peut pas mesurer les champs dans la matière.
- 3) Mesure de champs dans la matière : cycles d'hystérésis, expliquer le principe, tracer le cycle à l'oscilloscope.

II) Production de champs magnétiques

- 1) Matériaux ferromagnétiques et bobines, montrer sur le cycle d'hystérésis que les matériaux ferro peuvent avoir un champ rémanent, montrer les lignes de champ d'un aimant grâce à l'ensemble de petites boussoles. Montrer qu'une bobine crée un champ, dans le sens prévu.
- 2) Electro-aimant : on rajoute un noyau dans la bobine pour canaliser le champ, expliquer le principe de fonctionnement de l'électro-aimant, ressortir la courbe d'étalonnage précédente, discuter le faible hystérésis, tracer le champ en fonction de $1/e$ (e = taille de l'entrefer).
- 3) Champ tournant, fonctionnement de principe des machines asynchrones, faire l'expérience avec l'aiguille de boussole entre 3 bobines triphasées, mesurer la fréquence au stroboscope.

Conclusion : ouverture sur les applications des champs magnétiques, notamment tous les moteurs.

MP 16 : Milieux magnétiques.

Bibliographie :

- Quaranta IV
- Quaranta II
- Garing magnétisme (FeCl₃)
- Précis Bréal Electrotechnique PSI

Plan :

Introduction sur les milieux magnétiques, les différents comportements qu'on peut observer (aimantation spontanée, induites), redéfinir la susceptibilité magnétique.

I) Milieux diamagnétiques et paramagnétiques

- 1) Mise en évidence qualitative du dia et du paramagnétisme : barreaux de Bismuth (dia) et d'Aluminium (para) dans l'entrefer d'un électro-aimant, expliquer à l'aide de la force volumique en $\chi \text{ grad}(B^2)$.
- 2) Paramagnétisme d'un liquide : expérience avec N₂ et O₂ liquide dans l'entrefer d'un électro-aimant (ou déviation du filet de liquide par la présence d'un aimant fort), expliquer avec le modèle des OM pour ces deux molécules. Si on n'a pas de O₂, prendre 2 Dewar et faire passer le N₂ de l'un à l'autre, il se chargera en air liquide au fur et à mesure qu'on transvase.
- 3) Mesure de susceptibilité paramagnétique : FeCl₃, tracer la hauteur de déplacement en fonction de B², remonter à χ , en déduire le χ de FeCl₃ (additivité des χ volumiques).

II) Milieux ferromagnétiques.

- 1) Tracé du cycle d'hystérésis pour un matériau ferromagnétique, faire remarquer les deux domaines : linéaire et saturé, montrer que le χ est bien plus grand que pour les dia et para en approchant un aimant de l'électro-aimant.
- 2) Définir le champ rémanent et l'excitation coercitive, comparer les matériaux dur (cycle large, beaucoup de pertes) et doux (cycle étroit) et ferrimagnétiques (cycle indépendant de la fréquence car peu de courants de Foucault), tracer la désaimantation et la courbe de première aimantation (sur le fer doux par exemple).
- 3) Transition ferro-para : expérience avec le clou tenu par un aimant et chauffé, mesure approximative de la température de Curie (bien dire qu'ici on n'est pas rigoureusement en champ nul à cause de l'aimant). Éventuellement le faire avec plus ou moins d'aimants pour tenir le clou et tracer T=f(B).
- 4) Échelle microscopique : domaines de Weiss, montrer ce qu'on voit au microscope polarisé à l'aide de la flexcam.

Conclusion : ouverture sur les applications des matériaux ferromagnétiques, pour canaliser les champs par exemple (transformateur).

NB : Manip possible : visualisation du cycle d'hystérésis par effet Faraday.

MP 17 : Métaux

Bibliographie :

- Quaranta II, III et IV
- Ascroft
- Landau élasticité (si on fait les ondes de compression/cisaillement)
- JFLM tome 2
- Dictionnaire de physique, Taillet.

Plan :

Introduction : donner la définition d'un métal d'après le dictionnaire de physique, dire que toutes les propriétés qu'on va illustrer viennent du fait que les électrons sont délocalisés dans tout le métal.

I) Conductivité électrique

- 1) Mesure 4 points de la résistivité d'une bobine de cuivre, donner des exemples de conductivité pour des semi-conducteurs.
- 2) Dépendance de la conductivité par rapport à la température, faire la même mesure que précédemment en plaçant la bobine dans un bain thermostaté, tracer σ en fonction de $1/T$.
- 3) Densité de porteurs de charges dans l'argent : mesure par effet Hall, bien prendre une alimentation qui délivre jusqu'à 10 A et un micro-voltmètre numérique pour mesurer la tension Hall.

II) Conductivité thermique

- 1) Mesure de la conductivité thermique du cuivre, en régime sinusoïdal (créé par un module Peltier), donner des ordres de grandeur de conductivité thermiques d'autres matériaux, relier la conductivité thermique à la conductivité électrique par la loi de Wienman-Franz.
- 2) Différence de conductivité thermique dans différents métaux : plaquette toute faite pour voir l'avancée du flux de chaleur dans différents métaux.

III) Autres propriétés des métaux

- 1) Existence de formes allotropiques : caractère cristallin, recalescence du fer.
- 2) Propriétés mécaniques : mesure du module d'Young du Dural, utilisation de la lame de scie et de la jauge de contrainte.

Conclusion : ouverture sur les propriétés optiques des métaux (réflexion, production de lumière polarisée).

MP 18 : Matériaux semi-conducteurs.

Bibliographie :

- Sextant et Duffait optique
- Quaranta IV et III
- Notice des plaquettes à effet Hall
- « Dispositifs et circuits intégrés, semi-conducteurs »

Plan :

Introduction : donner la définition d'un semi-conducteur (bande de conduction vide à 0 K), introduire la notion de dopage, différencier les semi-conducteurs intrinsèques et extrinsèques (dopés). Ces caractéristiques impliquent des comportements particuliers.

- I) Influence de la température sur la conductivité d'un semi-conducteur
 - 1) Rappeler la dépendance pour un métal, donner la dépendance exponentielle pour un semi-conducteur. Réaliser la mesure à l'aide d'un ohmètre et d'un bain thermostaté pour une CTN. Remonter à l'ordre de grandeur du gap entre les deux bandes. Évoquer l'utilisation comme capteur de température.
- II) Effet Hall dans les semi-conducteurs
 - 1) Rappeler qu'avec les métaux c'est peu pratique vu qu'il y a une très grande densité de porteurs. Montrer le sens de la tension Hall est différent selon le dopage du semi-conducteur (P ou N). Tracer V_H en fonction de B (étalonner l'électro-aimant au préalable) pour le semi-conducteur dopé N. Remonter à la densité de porteurs dans le semi-conducteur, en déduire la mobilité des porteurs de charge (nécessite de mesurer la résistance de la plaquette qui n'est pas connue a priori)
 - 2) Éventuellement, tenter de montrer qu'à haute température la tension Hall s'inverse pour un semi-conducteur dopé P (il y a une plaquette avec un circuit fait pour chauffer la plaquette).
- III) Cellule photovoltaïque
 - 1) Expliquer brièvement le principe de la photodiode.
 - 2) Mesurer la puissance récupérée en fonction de la charge (résistance) branchée sur la cellule photovoltaïque, montrer qu'il existe une charge optimale.
 - 3) Calcul du rendement en mesurant la puissance lumineuse incidente à l'aide d'une photopile (le rendement attendu est très mauvais, < 1%).

Conclusion : ouverture sur les nombreuses applications en électronique (diode, transistor, thyristor, etc.).

MP 19 : Condensateurs, effets capacitifs, applications.

Bibliographie :

- Duffait électronique
- Quaranta IV
- Précis Bréal Électronique PSI

Plan :

Introduction : le condensateur est un objet qu'on a déjà étudié en électromagnétique et qui a de nombreuses applications en électronique.

I) Caractéristiques de la capacité d'un condensateur

- 1) Dépendance de la capacité avec la distance entre les armatures : condensateur d'Aepinus. Bien scotcher les fils (mesurer leur capacité au capacimètre), tracer C en fonction de $1/e$, remonter à la permittivité diélectrique de l'air.
- 2) Montrer l'influence d'une plaque de plexiglas entre les deux armatures du condensateur.

II) Mesures d'une capacité

- 1) Par résonance d'un circuit RLC série.
- 2) En utilisant un multivibrateur astable, l'intérêt étant alors qu'on transforme une capacité en un temps, ce que mesurent en priorité les outils de mesure numériques.

III) Effets capacitifs dans un câble coaxial

- 1) Estimation de la capacité linéique au capacimètre.
- 2) Mesure de l'impédance caractéristique et de la vitesse de propagation, estimation des capacité et inductance linéiques.

IV) Applications

- 1) Filtre RC, tracer le diagramme de Bode, évoquer l'utilisation comme détecteur de crête, comme intégrateur (le montrer en envoyant un créneau en entrée).

Conclusion : ouverture sur les détecteurs capacitifs, on a vu que la présence d'un matériau diélectrique entre les armatures d'un condensateur faisait varier la capacité, si on peut mesurer cette variation, on peut savoir quand un objet s'approche d'un condensateur.

MP 20 : Induction, autoinduction.

Bibliographie :

- Duffait électronique
- Quaranta IV
- Garing magnétisme

Plan :

Introduction : parler de la loi de modération de Lenz, faire une petite manipulation où on crée une tension aux bornes d'une bobine en faisant passer un aimant dedans, et où on vérifie que le champ créé par le courant induit s'oppose bien à la variation de flux initiale.

I) Vérification de la loi de Faraday

- 1) Utilisation d'un fluxmètre. Avec l'électroaimant, tracer le champ mesuré, en fonction du fluxmètre et d'un ampèremètre pour montrer qu'on a bien la tension induite qui est la dérivée temporelle du flux.

II) Mesures d'inductances

- 1) Par résonance d'un circuit RLC série.
- 2) Mesure de mutuelle inductance (chercher à « couplage » dans le Quaranta), dépendance en la distance entre les deux bobines.

III) Applications

- 1) Principe du transformateur (montrer la relation entre les tensions et les courants).
- 2) Rail de Laplace, principe de la machine à courant continu.
- 3) Mesure de conductance (ou de rapports de conductances) : chute d'un aimant dans un tube conducteur.
- 4) Éventuellement : principe de la machine asynchrone (si temps, et en expérience bonus).

Conclusion : ouverture sur le fait que l'induction a énormément d'applications industrielles (on peut évoquer le freinage inductif par exemple).

MP 21 : Conversion de puissance électrique-électrique.

Bibliographie :

- Duffait électronique
- Quaranta IV
- Précis Bréal PSI

Plan :

Introduction : importance de la conversion de puissance électrique-électrique pour le fonctionnement de tous les appareils électriques, en partant de la centrale de production jusqu'au consommateur.

I) Le transformateur : conversion alternatif/alternatif

- 1) Expérience qualitative pour montrer le rapport des tensions entre le primaire et le secondaire en fonction du nombre de spires. Donner les caractéristiques du transformateur parfait (intérêt d'augmenter la tension à puissance fixée pour diminuer les pertes pendant le transport).
- 2) Transformateur réel : mesure des pertes fer et des pertes cuivre.
- 3) Rendement en fonction de la charge (mesure directe et méthode des pertes séparées), notion de courant secondaire nominal (en se plaçant à tension primaire nominale).

II) Redresseur : conversion alternatif/continu

- 1) Redresseur simple et double alternance.
- 2) Ajout d'un filtre RC pour lisser le signal obtenu. Définition du taux d'ondulation et mesure du rendement (wattmètre TRMS avant et après le pont de diodes).

III) Hacheur : conversion continu/alternatif

- 1) Le hacheur dévolteur.
- 2) Tracé du courant et de la tension, calcul du rendement.
- 3) Choix de la bobine en fonction de la fréquence (en pratique faire varier la fréquence à bobine fixée), conduction interrompue.
- 4) Bonus : mettre le hacheur dévolteur après le redresseur et s'en servir pour alimenter une lampe dont on peut faire varier l'éclairement en fonction du rapport cyclique du hacheur dévolteur.

Conclusion : revenir sur ce qu'on a présenté, les applications industrielles, et le fait qu'on peut assez facilement avoir de bons rendements avec ces convertisseurs de puissance électrique-électrique.

MP 22 : Exemples de conversion électrique-mécanique.

Bibliographie :

- Le génie électrotechnique
- Hprépa Electronique II
- Précis Bréal PSI

Plan :

Introduction : il y a un peu plus d'un siècle, la principale source d'énergie était la combustion, qui servait à faire fonctionner les machines à vapeur. Aujourd'hui, elle a été remplacée par l'électricité, et nous allons étudier quelques exemples de machines qui permettent une conversion d'énergie électrique-mécanique.

I) La machine à courant continu, en fonctionnement génératrice.

- 1) À vitesse de rotation fixée, tracer la tension à vide en fonction du courant d'inducteur (donc du flux), tracé de l'hystérésis du champ magnétique dans l'inducteur. Dans la suite on sera toujours à flux fixé.
- 2) Vérification de la loi : $E_0 = k\Phi\Omega$, à flux fixé, en faisant varier la vitesse de rotation, mesure de $k\Phi$.
- 3) Étude électrique en charge, on fait varier la charge, à flux fixé et à vitesse de rotation constante (en pratique la vitesse de rotation varie avec la charge, il faut donc la régler à chaque fois). On trace d'abord $U = E - rI = f(I)$, pour remonter à la résistance interne du moteur (la comparer avec la valeur mesurée à l'ohmmètre), si la courbe est non-linéaire à grand I c'est à cause de la réaction magnétique d'induit (le courant induit crée un champ qui s'oppose au champ inducteur).
- 4) Étude mécanique en charge. Sur la mesure précédente on repère également le couple Γ et la vitesse de rotation Ω (qui est fixée). On trace $\Gamma = k\Phi I - \Gamma_{\text{frottement}} = f(I)$, on en déduit une seconde mesure de $k\Phi$.
- 5) Rendement en charge. Toujours à l'aide de la même mesure, on trace le rendement ($UI / \Gamma \Omega$) en fonction de la valeur de la charge (U/I), montrer l'existence d'une charge nominale, de rendement maximal.

II) La machine asynchrone, en fonctionnement moteur

- 1) Éventuellement, illustrer le principe avec les trois bobines alimentées en triphasé et la cage d'écureuil.
- 2) Tracé à fréquence d'alimentation fixée, le couple en fonction de la vitesse de rotation (en faisant varier la charge). On a une faible dépendance, et à couple nul on doit retrouver la fréquence de l'alimentation comme vitesse de rotation.
- 3) Rendement (on prend le générateur triphasé dont la tension est réglable), on mesure la puissance électrique (avec 2 wattmètres) et la puissance mécanique ($\Gamma \Omega$) en fonction de la charge. De même que précédemment, on doit avoir une charge nominale.

Conclusion : ouverture sur le fait qu'ici on s'est surtout intéressé à la conversion de puissance, mais qu'on peut aussi avoir de la conversion d'information avec des transducteurs (haut parleur).

MP 23 : Capteurs et transducteurs.

Bibliographie :

- Dictionnaire de physique (définitions)
- Quaranta IV
- Quaranta II

Plan :

Introduction : donner les définitions de capteurs et transducteurs.

- I) Étude de deux aspects des transducteurs
 - 1) Conversion de puissance : étude de la machine à courant continu. Tracé de la tension à vide en fonction de la vitesse de rotation, tracé du rendement en fonction de la charge, notion de charge nominale, rendement maximal.
 - 2) Diagramme de rayonnement d'un haut-parleur (intensité sonore en fonction de l'angle, à distance fixée de l'émetteur), étude sur un transducteur particulier d'un phénomène de diffraction « où dois-je me placer pour recevoir l'information ? »
 - 3) Conversion d'information : tracé de la réponse spectrale d'un haut-parleur en se servant du sonomètre comme référence (spectre plat), discuter la présence d'un maximum, toutes les fréquences ne vont pas être transmises de la même façon (déformation du signal initial). On ne peut pas vraiment faire un rendement quantitatif car il nous manque des facteurs multiplicatifs dans la mesure de la puissance acoustique. Discuter le fait que la fréquence de résonance correspond à celle pour laquelle le signal est le mieux transmis.

- II) Comparaison des caractéristiques de différents capteurs thermiques
 - 1) Présentation de différents capteurs thermiques (Pt100, CTN, thermomètre à alcool, thermocouple), tracé de leurs caractéristiques dans une plage de température donnée, vérification des lois attendues (linéarité, etc.)
 - 2) Comparaison de leur sensibilité.
 - 3) Comparaison de leur temps de réponse.

Conclusion : ouverture sur les très nombreuses utilisations des capteurs et des transducteurs dont les caractéristiques techniques doivent être connus afin qu'ils puissent être adaptés à l'utilisation que l'on veut en faire.

MP 24 : Mesures électriques (mesure de fréquences exclue).

Bibliographie :

- Duffait électronique
- Mesures électriques

Plan :

Introduction : parler du fait qu'on transforme très souvent une grandeur que l'on cherche à mesurer en grandeur électrique (avec un thermocouple par exemple), et que cela s'explique par le fait qu'on sait mesurer de façon précise et pratique les grandeurs électriques.

I) Principe de fonctionnement du voltmètre numérique

- 1) Principe : CAN simple rampe, tracer du temps mesuré en fonction de la tension « réelle » (mesurée au multimètre de table, bien être clair sur les incertitudes, pourcentage de la valeur + nombre de digits).
- 2) Mesure de valeur TRMS (multiplieur + filtre RC).
- 3) Limitations : impédance d'entrée du voltmètre. La mettre en évidence avec un circuit comprenant 2 résistances de $10\text{ M}\Omega$ (aux bornes des deux on a 6 V, mais si on se met aux bornes d'une seule, on a 2 V).
- 4) Limitations : diagramme de Bode du multimètre (en se servant de l'oscillo comme référence, car il a peut aller à des fréquences supérieures).
- 5) Un mot sur la mesure de forts courants : pinces ampèremétriques.

II) Mesures des valeurs de composants électriques

- 1) Mesure de résistance avec un circuit 4 fils.
- 2) Mesure de capacité à l'aide d'un multivibrateur astable.
- 3) Mesure d'inductance par résonance d'un circuit RLC.

Conclusion : revenir sur l'importance et la variété des montages d'électronique qui permettent la mesure de composants ou de tensions/courants, et leurs très nombreuses applications.

MP 26 : Mise en forme, transport et détection de l'information.

Bibliographie :

- Duffait, électronique.
- Quaranta IV

Plan :

Introduction sur les problèmes liés à la transmission d'un signal (amortissement) et les solutions possibles (propagation guidée) qui nécessitent une mise en forme particulière (modulation) et une détection de la part du destinataire (démodulation).

I) Un exemple de propagation guidée : transmission dans un câble coaxial

- 1) Visualiser un pulse et son écho dans un câble coaxial, calcul de l'atténuation (cf. Quaranta), montrer la dépendance en fréquence. Dire que les canaux de transports ont des plages de fréquence privilégiées (donner des OdG) et donc que pour transmettre un signal sonore par exemple, on va être obligé de le moduler.

II) La modulation d'amplitude

- 1) Dispositif modulant, analyse spectrale du signal modulé, montrer la sous et la sur modulation, éventuellement montrer que la modulation est linéaire en la modulante (à porteuse fixée).
- 2) Une méthode de démodulation : détecteur de crête (impossible si on est surmodulé), montrer un exemple.
- 3) La détection synchrone, nécessite de connaître la fréquence de la porteuse, montrer le spectre du signal modulé remultiplié par la porteuse, montrer la démodulation (on peut brancher un micro en entrée, mettre un diapason devant, et montrer le signal démodulé qu'on récupère).
- 4) Bien dire que l'inconvénient de la modulation en amplitude est qu'on consomme beaucoup d'énergie pour créer la porteuse qui n'est pas le signal intéressant (et aussi la sensibilité au bruit).

III) La modulation en fréquence

- 1) Principe de fonctionnement avec un oscillateur commandé en tension, montrer le spectre du signal obtenu.
- 2) Principe de la démodulation de fréquence : transformer la modulation de fréquence en modulation d'amplitude, rendu possible par l'utilisation d'un filtre passe-bande d'un côté de sa fréquence de coupure (le gain en dB est alors linéaire en fréquence, d'où le passage fréquence-amplitude). Montrer le diagramme de Bode du filtre et le signal démodulé.

Conclusion : on a montré le principe de fonctionnement de la modulation sur des signaux analogiques, la modulation est nécessaire au transport de l'information. Il existe d'autres méthodes pour les signaux numériques.

MP 27 : Acquisition, traitement et analyse d'un signal.

Bibliographie :

- Duffait, électronique.

Plan :

Introduction sur l'utilité d'une chaîne d'acquisition, de traitement et d'analyse de signal pour la physique (exemples concrets : micro, capteurs de température, potentiomètre pour remonter à un angle, etc.). Utilisation fréquente d'outils numériques, ce pourquoi on va s'y intéresser plus particulièrement.

I) Acquisition d'un signal

- 1) L'échantillonneur bloqueur (boîte toute prête), expliquer le principe, montrer le résultat sur un sinus. Bien penser à dire que l'oscillo et Synchronie + ordinateur sont des chaînes bien plus sophistiquées et optimisées que les prototypes qu'on a présentés.
- 2) Le CAN simple rampe (le faire à la main), expliquer le principe, le réaliser sur une constante (par exemple un thermocouple si on veut utiliser un signal « physique »), discuter le temps de rampe, la précision (temps de basculement de l'interrupteur), tracer une droite valeur de la tension à mesurer/valeur donnée par le CAN.

II) Conséquences de l'échantillonnage pour le traitement d'un signal

- 1) Mise en évidence « intuitive » du critère de Shannon sur Synchronie.
- 2) Analyse de Fourier, redonner le critère de Shannon, parler de repliement de spectre, définir le filtre anti-repliement, montrer l'influence de la fenêtre totale de temps (résolution spectrale), parler de compromis à faire lorsqu'on a un nombre de points fixé (comme c'est le cas dans Synchronie).

III) Un exemple plus exotique, la détection synchrone

- 1) Description du principe et réalisation, montrer que sans la détection synchrone on n'a rien du tout, montrer qu'on arrive à obtenir le signal grâce à la détection (on choisit un signal oscillant à une fréquence suffisamment basse pour ne pas être couper par la détection synchrone, et dont la fréquence permet de montrer que c'est bien le signal voulu et pas autre chose qu'on récupère). On peut tracer l'amplitude du signal reçu en fonction de l'amplitude fournie à la lampe.

Conclusion : récapitulation, rajouter qu'a priori pour avoir une chaîne « complète » d'acquisition, il faut rajouter une mémoire et une base de temps.

MP 28 : Mesures de fréquences temporelles (domaine de l'optique exclu).

Bibliographie :

- Duffait, électronique.
- Quaranta I
- BUP 867

Plan :

Introduction sur le fait qu'on a souvent à mesurer des fréquences, que ça soit pour remonter à des grandeurs physiques (repérer une fréquence de résonance par exemple) ou pour vérifier que l'on est dans la bonne gamme par rapport à l'instrument qu'on utilise (un haut parleur par exemple).

I) Mesure de fréquence par comptage

- 1) Le pendule pesant, compter « à la main », un certain nombre de passage à la verticale, remonter à la fréquence.
- 2) Le fréquencemètre électronique (compteur d'impulsion), expliquer le principe, bien montrer les différents signaux à l'oscilloscope, brancher un micro sur un comparateur, suivi d'une diode et d'un pont diviseur de tension (pour se ramener à un signal 0 ou 5 V), le mettre en entrée du fréquencemètre, mesure la fréquence d'un diapason. Penser à comparer avec le fréquencemètre commercial.

II) Mesure de fréquence par comparaison

- 1) La stroboscopie, expliquer le principe, l'appliquer à la mesure d'une fréquence d'un disque en rotation (bien dire qu'on doit commencer par les hautes fréquences, sinon on risque de tomber sur un multiple de la période, ce phénomène revient au critère de Shannon).
- 2) La détection synchrone (faire un exemple sur de l'effet Doppler avec un haut parleur sur une table traçante, ou sur un haut-parleur tout bête si on n'a pas la table traçante).

III) Mesure de fréquence par transformée de Fourier

- 1) Pendules couplés, on excite la chaîne de pendule, on enregistre le signal avec vidéocom, on fait la transformée de Fourier, on récupère les fréquences propres du système. Illustrer le fait qu'elles correspondent à des modes propres.

Conclusion : ouvrir sur la spectroscopie optique.

MP 29 : Mesure de longueurs

Bibliographie :

- Duffait optique, Sextant
- Bellier Optique
- Notice de la diffraction des électrons

Plan :

Introduction sur le fait qu'on a souvent besoin de mesurer des longueurs, mais que la gamme de longueurs « accessibles » est énorme entre la taille d'un atome, et la distance entre la Terre et une étoile extrasolaire.

I) Mesures usuelles de longueurs

- 1) Un mot sur les outils « communs » pour mesurer des longueurs dans la vie de tous les jours, présentation du mètre ruban, du pied à coulisse, du palmer, bien différencier leur usage.
- 2) Télémètre acoustique, illustrer le principe avec deux micros (on suppose qu'on connaît la vitesse du son), montrer le télémètre commercial.

II) Mesures de grandes distances

- 1) Méthode la parallaxe (Bellier), l'illustrer avec deux goniomètres. La précision ici n'est pas géniale puisque c'est une méthode qui est surtout utilisée pour remonter à des distances astronomiques.
- 2) Évoquer la télémétrie laser (ne pas la faire, parce que ça ne marche pas très bien), qui a permis de mesurer par exemple la distance Terre-Lune (avec un miroir posé à sa surface), parler du fait que le mètre n'est plus défini que par la valeur « fixée » de la vitesse de la lumière.

III) Mesures de petites distances

- 1) Mesure de l'épaisseur d'un cheveu par diffraction (utiliser un laser, pour plus de simplicité).
- 2) Mesure de l'épaisseur d'une lamelle de verre à l'aide d'un interféromètre de Michelson (bien expliquer l'intérêt de se mettre en lumière blanche).
- 3) Mesure de la distance entre les atomes de carbone par diffraction des électrons (ne pas s'appesantir sur la théorie).

Conclusion : ouverture sur le choix de la longueur d'onde de l'onde que l'on doit prendre selon la taille des structures que l'on cherche à sonder par diffraction/interférence.

MP 30 : Systèmes bouclés (oscillateurs exclus)

Bibliographie :

- Duffait électronique

Plan :

Introduction sur l'intérêt du bouclage, ici on ne va s'intéresser qu'à des systèmes stables, c'est-à-dire des asservissements, et qui plus est on va se limiter aux systèmes analogiques.

I) L'AO inverseur

- 1) Présentation rapide du modèle de l'AO, mesure des paramètres « en boucle ouverte » (gain, et bande passante), suivre le montage du Duffait, attention au réglage de l'offset. Le gain est tel que la moindre fluctuation entraîne une dérive (on peut par exemple souffler sur l'AO avec un sèche-cheveux).
- 2) Intérêt du bouclage, montrer le principe, calcul du nouveau gain et de la nouvelle bande-passante (conservation du produit gain x bande passante).

II) Le moteur asservi en position

- 1) Le principe de fonctionnement, bien détailler les différents morceaux de la chaîne (bien dire qui est qui), montrer que la sortie (angle) suit la commande d'entrée (tension).
- 2) Fonction de transfert du moteur asservi en position (en gain fort), faire une réponse indicielle, dériver le signal reçu, en faire la transformée de Fourier, on obtient la fonction de transfert du système bouclé, noter la fréquence de résonance et le gain maximal.
- 3) Le rôle du gain sur les différents paramètres (temps de réponse, dépassement, erreur statique).
- 4) Améliorations de l'asservissement, utilisation de capacité pour réduire le dépassement à gain fixé.

Conclusion : ouverture sur les oscillateurs (qui sont des systèmes bouclés instables) et/ou sur les systèmes asservis numériques (deux portes « non » à la suite forment une mémoire).

MP 31 : Instabilités et phénomènes non linéaires.

Bibliographie :

- Krobb
- Faroux Renault Mécanique (pendule pesant, formule de Borda)
- Gouttes Perles Ondes (instabilité de Rayleigh-Plateau)
- BUP 867

Plan :

Introduction sur le fait qu'on étudie en général des équations linéaires ou linéarisées autour d'un point d'équilibre, et général des solutions stables, mais qu'il existe une grande richesse des systèmes non-linéaires et des instabilités que l'on peut observer.

- I) Un système non-linéaire : le pendule pesant aux grands angles
 - 1) Mesurer la période du pendule aux petits angles pour remonter à son moment d'inertie (utiliser Synchronie et le potentiomètre pour les mesures de période).
 - 2) Montrer la vérification de la formule de Borda pour la période des oscillations aux grands angles.
 - 3) Vers un système encore plus linéaire : ajout d'aimants pour créer un double puits de potentiels, dire qu'on peut faire l'analogie avec un système électronique, montrer le comportement à l'aide du portrait de phase.

- II) Une instabilité : l'instabilité de Rayleigh-Plateau
 - 1) Montrer que le filet de fluide déposé sur une corde se découpe spontanément en gouttelettes, montrer que l'ordre de grandeur de la taille des gouttes correspond à la longueur d'onde instable du système.

- III) Un oscillateur fonctionnant sur les instabilités et non-linéaire : le Van der Pol
 - 1) Décrire le dispositif, bien relier chaque terme de l'équation à une partie du dispositif expérimental.
 - 2) Montrer l'existence d'une bifurcation (où un cycle stable apparaît dans le portrait de phase) au-delà d'un certain seuil.
 - 3) Montrer la stabilité du cycle, et le ralentissement critique (plus on est proche du seuil, plus le temps de retour au cycle limite est long quand on s'en est éloigné).
 - 4) Montrer l'enrichissement spectral, plus on s'éloigne du cycle plus le système est « non-linéaire » (on voit alors apparaître un signal avec de nombreuses harmoniques).

Conclusion : ouverture sur les systèmes chaotiques (le pendule double par exemple).

MP 32 : Ondes : propagation et conditions aux limites.

Bibliographie :

- Quaranta I et IV
- Notice du banc hyper fréquence

Plan :

Introduction sur le fait qu'on a étudié différents phénomènes ondulatoires, on va mettre en évidence différentes caractéristiques de la propagation et des conditions aux limites dans différents domaines de la physique.

I) Propagation libre d'ondes acoustiques

- 1) Mettre en évidence la propagation des ondes acoustiques, faire une mesure de la vitesse du son, bien dire que les ondes lumineuses se propagent également.

II) Notion d'impédance, et conditions aux limites

- 1) Exemple du câble coaxial pour la mesure de l'impédance caractéristique du milieu, envoyer un pulse, régler une résistance variable en sortie du câble de sorte à ce que l'écho soit le plus faible possible. Bien faire le lien entre le signe de l'écho que l'on observe et l'impédance du milieu en sortie du câble (câble en court-circuit = impédance nulle, câble non branché = impédance infinie), à l'aide des coefficients de transmission/réflexion exprimés avec les impédances des milieux. Bien faire l'analogie avec les lois de Snell-Descartes.
- 2) Conditions aux limites strictes et ondes stationnaires, cas de la corde de Melde, mode résonnants, les montrer au stroboscope.

III) Propagation guidée : banc hyperfréquence

- 1) Dans le banc, on a l'établissement d'un système d'ondes stationnaires, mesure du taux d'onde stationnaire en fonction des conditions aux limites en sortie du banc.
- 2) À l'extérieur du banc on a des ondes libres qui se propagent, mesure de la relation de dispersion à l'aide du « Fabry Pérot » hyperfréquence.
- 3) Dans le banc la relation de dispersion n'est plus aussi simple que lorsque la propagation est libre, mesure de la relation de dispersion pour les ondes stationnaires.

Conclusion : ouverture sur les couches antireflet, l'adaptation d'impédance (échographie, etc).

MP 34 : Résonance.

Bibliographie :

- Duffait élec
- Notice de la cavité Fabry-Pérot pour les lasers

Plan :

Introduction sur le fait qu'on a étudié les phénomènes de résonance de façon théorique, et qu'on va maintenant en étudier quelques uns dans différents domaines de la physique.

I) Le RLC série.

- 1) Mesure de la fréquence de résonance en courant (en mode XY), utilisation pour la mesure de L ou de C (selon laquelle des deux valeurs est déjà connue).
- 2) Tracé du diagramme de Bode, discuter la fréquence de résonance (déjà mesurée) et le facteur de qualité, montrer une réponse indicielle, mettre en relation le facteur de qualité « théorique » avec le nombre d'oscillations observé (et avec la largeur de la résonance dans le diagramme de Bode).
- 3) Résonance en tension, montrer qu'elle a lieu pour une tension différente de la résonance en courant, d'autant moins différente que le facteur de qualité est grand.

II) Modes résonnants : corde de Melde

- 1) Montrer les modes résonnants avec la corde de Melde et un stroboscope, remonter à la valeur de la masse linéique à l'aide de la mesure de la première fréquence de résonance (la tension de la corde est le poids qui s'exerce sur la masse attachée à son extrémité), comparer à une mesure « directe » (masse/longueur). Estimer le facteur de qualité ($f_{res}/\Delta f_{res}$).
- 2) Éventuellement : montrer qu'on a exactement le même type de phénomène dans le tube de Kundt (sauf qu'on a une onde de compression et pas une onde transverse).

III) Résonance optique : cavité Fabry-Pérot

- 1) Expliquer le principe de fonctionnement de la cavité Fabry-Pérot, montrer le signal que l'on obtient lorsqu'on envoie un laser dans la cavité.
- 2) Bien discuter le Free Spectral Range, et la finesse de la cavité (en déduire le facteur de qualité de la résonance).
- 3) Mesurer la largeur spectrale d'un pic du laser, si ce dernier est plus large que la finesse de la cavité de mesure, on peut en déduire la finesse de la cavité qui sélectionne les modes résonnants dans le laser (et donc estimer son facteur de qualité).

Conclusion : ouverture sur les applications aux filtres.

MP 35 : Oscillateurs auto-entretenus.

Bibliographie :

- Duffait élec
- Krobb

Plan :

Introduction sur la définition des oscillateurs auto-entretenus, le fait qu'ils présentent une oscillation alors qu'ils sont alimentés par des sources continues.

I) L'oscillateur de Wien

- 1) Étude de la fonction de transfert en boucle ouverte, bien montrer qu'on a un amplificateur et un filtre passe-bande, énoncer le critère de Barkhausen, montrer qu'on va pouvoir avoir oscillation s'il est respecté.
- 2) Qualité du signal obtenu, faire une transformée de Fourier, calculer le taux de distorsion harmonique (le poids relatifs des harmoniques par rapport au fondamental) et le coefficient de stabilité en fréquence (la largeur du pic de fréquence divisé par la fréquence centrale).

II) Les oscillateurs à relaxation

- 1) Le vase de Tantale, expliquer le principe, montrer le fonctionnement (il n'y a pas vraiment de mesure intéressante à faire, la fréquence que l'on obtient dépend uniquement du débit d'eau et de la hauteur du tuyau coudé).
- 2) Le multivibrateur astable, vérifier que la fréquence que l'on obtient dépend bien de la résistance et de la capacité utilisées (mentionner qu'on peut s'en servir pour mesurer des capacités). On peut créer un créneau dont le rapport cyclique est variable en remplaçant la résistance par un montage avec deux diodes et deux résistances (intéressant à montrer).

III) Autres oscillateurs

- 1) Principe de l'oscillateur « numérique », faire le montage du détecteur de lumière avec la photorésistance et placer l'ampoule devant le détecteur, on a alors un montage équivalent à un bloc « non » dont l'entrée est branchée sur la sortie (avec un temps de délai entre les deux), mesurer la fréquence obtenue, elle permet de remonter approximativement au temps de réponse de la photorésistance (rigoureusement on remonte au temps de réponse de l'ensemble, ce qui inclut également le temps de basculement du relais).
- 2) Si temps : l'oscillateur de Van der Pol.

Conclusion : ouverture sur d'autres oscillateurs comme les oscillateurs à Quartz qui sont utilisés pour avoir des références de fréquence.

MP 36 : Couplage des oscillateurs.

Bibliographie :

- Quaranta I et IV
- BUP 867

Plan :

Introduction sur la définition du couplage entre deux oscillateurs « il y a couplage si les deux oscillateurs échangent de l'énergie », dire qu'on va regarder quelques exemples dans différents domaines de la physique.

I) Les pendules couplés

- 1) Définir le système, mesurer la période libre pour en déduire le moment d'inertie du pendule.
- 2) Ajouter le couplage, fixer l'un des deux pendules, mesurer à nouveau la période (nécessite une bonne précision), en déduire la valeur de la constante de couplage.
- 3) Montrer l'existence de deux modes propres, qui ont chacun leur pulsation propre, et qui se conservent. Mesurer les fréquences et les comparer aux valeurs théoriques attendues.
- 4) Montrer la conservation de l'énergie totale (ne pas oublier le terme de couplage), et l'échange d'énergie entre les deux pendules (bien dire que si l'énergie totale diminue c'est à cause des frottements qu'on a négligés dans l'approche théorique).

II) Oscillateurs couplés en électronique : circuits RLC couplage capacitif

- 1) Définir le dispositif, mesurer la fréquence de résonance d'un des deux circuits RLC, régler l'autre de sorte à ce qu'il ait la même fréquence de résonance, évaluer le facteur de qualité.
- 2) Introduire le couplage, faire la réponse à un échelon, montrer les battements dans la réponse temporelle et les deux fréquences dans la TF (comparer aux valeurs théoriques attendues), montrer la dépendance de la fréquence des modes propres avec la valeur de la constante de couplage.

III) Couplage de plus de 2 oscillateurs : la chaîne de pendules couplés

- 1) Mesurer le signal avec videocom pour une excitation quelconque, faire la transformée de Fourier, montrer qu'on a autant de fréquences propres que d'oscillateurs couplés, vérifier qu'elles correspondent aux valeurs attendues.
- 2) Exciter alternativement chacun des modes propres grâce au moteur pas-à-pas.

Conclusion : ouverture sur les relations de dispersion qui apparaissent (modèle de la chaîne infinie d'oscillateurs couplés) et les ondes qui peuvent se propager dedans.

MP 37 : Filtrage de signaux.

Bibliographie :

- Duffait élec
- Duffait optique, Sextant
- Quaranta I

Plan :

Introduction sur le fait qu'on a vu l'utilité du filtrage en électronique, mais qu'on peut être vouloir filtrer des signaux dans bien d'autres domaines de la physique, ce que l'on va faire que quelques exemples.

I) Exemples de filtres électroniques

- 1) Le filtre RC, tracé du diagramme de Bode (module et phase) point par point, discussion sur la fréquence de coupure (comparer à la valeur théorique). Montrer le comportement intégrateur sur un créneau. Intérêt pratique sur un signal bruité (soit prendre des longs fils pour avoir du bruit à 50Hz, soit faire un sommateur à AO et mettre un signal BF et un signal « noise » du GBF).
- 2) Le filtre RLC, tracé du diagramme de Bode par réponse impulsionnelle (éventuellement comparer à un fait point par point), discuter la fréquence de résonance, la bande passante et le facteur de qualité, donner des exemples d'application (démodulation de fréquence par exemple).

II) Exemple de filtrage mécanique : système masse + ressort

- 1) On peut montrer la réponse du système en l'excitant à différentes fréquences avec le moteur pas-à-pas (attention à la résonance de ne pas tout casser).
- 2) Faire la réponse indicielle à l'aide du dispositif où la masse et le ressort sont attachés verticalement, suivi d'une tige métallique qui plonge dans une éprouvette remplie d'eau salée, munie de deux électrodes entre lesquelles on impose une DDP (ainsi le potentiel de la tige dans l'éprouvette variera linéairement avec sa profondeur). Montrer qu'on a un filtre passe-bas avec une résonance, dire que c'est le principe de fonctionnement d'un amortisseur, dire que c'est également ce type de phénomène qui fait qu'on n'entend que les basses fréquences de la musique des voisins (les murs font office de passe-bas). Comparer la fréquence de résonance avec la théorie (masse et raideur du ressort mesurées en préparation).

III) Exemple de filtrage de fréquences spatiales en optique

- 1) Principe de fonctionnement avec le filtrage passe-bas d'une grille (bien prendre une grille très fine), montrer l'image dans le plan de Fourier, et l'image de l'objet, bien discuter l'action du filtrage.
- 2) Application au détramage d'une photographie.

Conclusion : ouverture sur des opérations plus complexes de traitement des signaux (détection synchrone par exemple).

MP 38 : Régimes transitoires.

Bibliographie :

- Duffait élec
- Garing Ondes mécanique et diffusion
- Quaranta II

Plan :

Introduction sur la définition du régime transitoire, on va en étudier quelques uns et voir qu'elles sont leurs applications possibles.

I) Illustrations de différents types de régimes transitoires sur le RLC

- 1) On regarde la tension aux bornes du condensateur. Montrer que selon la valeur du facteur de qualité on a différents types de régime (apériodique ou pseudopériodique), mesurer la fréquence d'oscillation du régime pseudopériodique, relier le facteur de qualité au temps d'amortissement. Comparer aux valeurs attendues.

II) Utilité du régime transitoire

- 1) Le régime transitoire permet de remonter à des propriétés du régime forcé (en effet, dans les deux cas, le système est régi par la même équation). Montrer comment la réponse indicielle (ou impulsionnelle) permet de reconstruire le diagramme de Bode du filtre RLC (et comparer au diagramme de Bode point par point).
- 2) Le régime transitoire permet également de remonter à des valeurs caractéristiques du retour vers l'équilibre, par exemple un coefficient de diffusion. Expérience de la diffusion du glycérol dans l'eau, estimation du coefficient de diffusion. Dire qu'on aurait pu faire le même genre de chose avec un choc thermique dans une barre de cuivre et remonter au coefficient de diffusion thermique.
- 3) La décharge d'un condensateur et le principe du détecteur de crête et de l'échantillonneur bloqueur : on se sert d'un temps de relaxation très lent (montrer la décharge d'un circuit RC) pour « conserver » une valeur le temps nécessaire à l'établissement d'une nouvelle valeur.
- 4) Contrôle du régime transitoire dans le cas d'un moteur asservi en position, montrer l'effet de la résistance sur le dépassement (et sur le gain), pour conserver le gain tout en réduisant le dépassement, on ajoute des capacités pour modifier le facteur de qualité sans changer le gain.

Conclusion : ouverture sur le fait que dans la vie de tous les jours on est confrontés à de nombreux régimes transitoires (tous les temps de « chauffe » des différents appareils électroménagers par exemple).

MP 39 : Phénomènes de transport.

Bibliographie :

- Guyon Hulin Petit
- Garing Ondes mécanique et diffusion
- Quaranta II

Plan :

Introduction sur la définition d'un phénomène de transport, bien mentionner qu'il en existe différents types.

I) Un phénomène de convection

- 1) Convection thermique avec le tube coudé, un bec bunsen et du colorant (fluide coloré, non miscible mais de densité proche à celle de l'eau). Expérience uniquement qualitative, bien décrire le phénomène.

II) Quelques phénomènes de diffusion

- 1) Diffusion de particules : diffusion du glycérol dans l'eau, remonter à un ordre de grandeur du coefficient de diffusion.
- 2) Diffusion thermique dans un barreau de cuivre, regarder le signal en régime permanent (forçage sinusoïdal), on a deux moyen de remonter à la diffusivité thermique (regarder les amplitudes ou le déphasage).
- 3) Diffusion de quantité de mouvement, bien rappeler que la viscosité s'interprète comme de la diffusion de quantité de mouvement, et dire qu'il en découle pour un objet sphérique une force de frottement visqueux, la force de Stokes, on va se servir de cette force pour remonter à la valeur du « coefficient de diffusion » qu'est la viscosité. Bien vérifier que le Re est très faible et que le régime transitoire est court (éventuellement parler de l'influence des parois).

III) Transport d'énergie par rayonnement

- 1) La loi du corps noir, vérifier la loi de Stefan (surtout la dépendance en T^4) avec une ampoule dont on mesure la puissance électrique consommée et un pyromètre optique (soit le « manuel », soit le « moderne » qui a priori donnera des meilleurs résultats mais qui a le défaut d'être une boîte noire).

Conclusion : ouverture sur d'autres phénomènes de transport, comme la conduction électrique dans les métaux.

MP 40 : Phénomènes dissipatifs.

Bibliographie :

- Guyon Hulin Petit
- Précis Bréal Électrotechnique
- Sanz PC/PC*
- Quaranta II

Plan :

Introduction sur la définition d'un phénomène dissipatif : système qui perd de l'énergie qui est dissipée sous forme d'agitation thermique.

I) Phénomènes dissipatifs électriques

- 1) Effet Joule, vérification du fait qu'une résistance dissipe totalement l'énergie électrique qui lui est fournie sous forme d'énergie thermique. Mesure avec une résistance plongée dans un Dewar rempli d'eau, comparaison entre l'énergie fournie à la résistance et l'augmentation de température de l'eau dans le Dewar.
- 2) Pertes d'un transformateur, pertes cuivre (qui ne sont rien de plus que de l'effet Joule) et pertes fer (qui sont due aux courants de Foucault et à l'hystérésis qui existe entre B et H). Bien mesurer les deux séparément, bien montrer que dans le domaine où on estime l'une, l'autre est négligeable.

II) Phénomènes dissipatifs mécaniques

- 1) Force de frottement fluide due à la viscosité d'un liquide, étude de la chute de billes d'acier dans le glycérol, remonter à la valeur de la viscosité du liquide, bien justifier les hypothèses (Re faible et temps d'établissement de la vitesse limite court devant le temps de l'expérience).
- 2) Force de frottement solide : stick-slip, mettre en évidence l'existence de la force de frottement solide (calcul des coefficients statique et dynamique), calculer l'ordre de grandeur de la puissance dissipée à cause de ce frottement.

Conclusion : ouverture sur le fait qu'on cherche en général à minimiser les effets dissipatifs pour ne pas utiliser de l'énergie pour autre chose que le fonctionnement que l'on cherche à obtenir (exemple pour les moteurs ou les transformateurs).