

LP 01 : Contact entre deux solides. Frottement de glissement. Applications au glissement et au roulement.

Bibliographie :

- Dunod PC (stick-slip)
- Tec et Doc
- BFR mécanique
- Portelli (quatre-quatre)

Prérequis :

- Mécanique du point et du solide

Plan :

Intro : nous avons pour l'instant vu la mécanique en négligeant systématiquement les frottements, nous allons voir aujourd'hui un modèle des forces de frottement solide.

#### I) Contact entre deux solides

- 1) Modélisations des types contacts, choix du contact ponctuel, définition de la vitesse de glissement, vitesse de pivotement et de roulement (qu'on supposera nulles).
- 2) Lois de Coulomb (lois phénoménologiques), OdG des coefficients de frottement pour différents matériaux.
- 3) Aspect microscopique (ne pas s'attarder, en gros on peut surtout dire que plus ou moins du Van der Waals, que c'est compliqué et qu'on ne sait pas vraiment faire).
- 4) Puissance dissipée par le frottement (on peut faire l'OdG pour le frottement de deux mains).

#### II) Glissement et frottement de glissement

- 1) Rupture d'équilibre, notion d'hystérésis du frottement, palet sur une pente inclinée.
- 2) Notion d'arc-boutement, exemple des vis (BFR).
- 3) Un exemple plus compliqué, le stick-slip.

#### III) Roulement

- 1) Roulement sans glissement, exemple de la voiture (simplifiée à 2 roues).
- 2) Apparition du glissement.
- 3) Energie perdue lorsque les roues patinent.

Conclusion : ouverture sur les modélisations microscopiques pour expliquer les frottements qui sont des sujets de recherche actuels (tribologie).

LP 02 : Caractère non galiléen du référentiel terrestre. Conséquences.

Bibliographie :

- BFR
- Brasselet
- Portelli (quatre-quatre)

Prérequis :

- Mécanique newtonienne
- Formule de changement de référentiel
- Bases de mécanique des fluides

Plan :

Intro : on a étudié les changements de référentiels et l'expression du principe fondamental de la dynamique dans un référentiel non galiléen, nous allons nous intéresser à décrire des phénomènes qui mettent en évidence le caractère non galiléen du référentiel terrestre.

- I) Le référentiel terrestre, position du problème
  - 1) Définition des référentiels héliocentrique, géocentrique et terrestre.
  - 2) Notion de jour solaire et de jour sidéral.
- II) Conséquences de la translation du référentiel terrestre : forces de marée
  - 1) Mise en équation, OdG (qui justifient qu'on ne garde que les termes dus au soleil et à la lune).
  - 2) Terme différentiel de marée.
  - 3) Les marées terrestres, amplitudes extrêmes, bien dire qu'ici on trouve des explications pour les marées en pleine mer, mais que pour ce qu'il se passe sur les côtes (ou la géométrie de la côte joue beaucoup), c'est plus compliqué.
- III) Conséquences de la rotation de la Terre
  - 1) Mise en équation, OdG des termes.
  - 2) Terme inertiel, variation de la gravité en fonction de la latitude (à cause du terme centrifuge qui est pris en compte dans sa définition).
  - 3) Terme de Coriolis, déviation vers l'Est, cyclones et anticyclones, mouvement de fluide dans le robinet (on montre avec les OdG que Coriolis est négligeable à cette échelle).

Conclusion : ouverture sur les modélisations microscopiques pour expliquer les frottements qui sont des sujets de recherche actuels (tribologie).

LP 03 : Mouvement d'un solide autour d'un axe fixe. Équilibrage statique et dynamique.  
Exemples.

Bibliographie :

- Pérez, Mécanique
- Agati, Mécanique du solide (Dunod)
- Chèze, Mécanique 2<sup>ème</sup> année

Prérequis :

- Mécanique du solide : matrice d'inertie, théorème du moment cinétique

Plan :

Intro : applications de notions vues dans le cours de mécanique à l'étude d'un type particulier de systèmes.

I) Mouvement d'un solide autour d'un axe fixe.

- 1) Présentation du contexte, rappel de la définition de solide indéformable, choix des référentiels
- 2) Liaison mise en jeu, réalisations expérimentales des liaisons, bilan des forces et des moments
- 3) Accélération du centre de masse et dérivée du moment cinétique
- 4) Application des théorèmes mécaniques (PDF et TMC), équations du mouvement, introduction de la liaison parfaite pour avoir un système résoluble
- 5) Exemple : volant d'inertie

II) Équilibrage statique

- 1) Introduction du problème, intérêt industriel → exemple expérimental
- 2) Réalisation de l'équilibrage à partir des équations
- 3) Exemple : roue de voiture

III) Équilibrage dynamique

- 1) Insuffisance de l'équilibrage statique → exemple expérimental
- 2) Réalisation à partir des équations
- 3) Exemple : roue de voiture
- 4) Réalisation industrielle de l'équilibrage (banc d'équilibrage)

Conclusion : ouverture sur les applications industrielles.

LP 04 : Approximation gyroscopique. Effets dans les domaines macroscopiques et microscopiques.

Bibliographie :

- Bertin Faroux Renault : Mécanique du solide et des systèmes (ou Mécanique 2, mais il n'y a pas les angles d'Euler dans celui-là)
- Boutigny Mécanique 2 (pour le traitement complet avec les matrices d'inertie)
- Pérez mécanique (précession des équinoxes, stabilisation bateau et microscopique)
- Feynman et « Les astuces de Feynman » (pour les exemples macroscopiques)

Prérequis :

- Mécanique du solide : matrice d'inertie, théorème du moment cinétique
- Electromagnétisme : couple exercé par un champ sur un moment magnétique

Plan :

Intro : applications de notions vues dans le cours de mécanique à l'étude d'un type particulier de systèmes.

- I) Introduction de l'approximation gyroscopique : la toupie symétrique
  - 1) Introduction du problème (solide en rotation autour d'un point fixe), définition de l'approximation gyroscopique, OdG pour la toupie
  - 2) Equations du mouvement (ne pas oublier de dire qu'on néglige les frottements)
  - 3) Calcul de la réaction du support
  - 4) Couple gyroscopique (lorsqu'on force le changement d'axe de rotation)
- II) Exemples macroscopiques
  - 1) Gyroscope unidirectionnel (gyro-compass)
  - 2) Effet paradoxal (expériences avec le gyroscope de la collection, et la chaise et la roue de vélo)
  - 3) Stabilisation du roulis d'un bateau
- III) Exemples microscopiques
  - 1) Action d'un champ magnétique sur un moment magnétique, précession de Larmor
  - 2) Modèle classique de l'atome de Bohr, rapport gyromagnétique, vérification de l'approximation gyroscopique (Pérez)
  - 3) Application à la RMN

Conclusion : récapituler, éventuellement parler de la précession des équinoxes et des applications de la RMN.

LP 05 : Exemples d'utilisation des lois de conservation en dynamique des systèmes.

Bibliographie :

- Bertin Faroux Renault : Mécanique
- Brasselet Mécanique PCSI/MPSI
- Feynman (moment cinétique)
- Dunod PC/PC\*

Prérequis :

- Mécanique du point et des systèmes de points.

Plan :

Intro : nous avons déjà vu les équations qui régissent les systèmes mécaniques, mais nous allons revenir en détail sur les lois de conservation et leurs applications.

- I) Les différentes lois de conservation
  - 1) Conservation de la quantité de mouvement (pour un système isolé ou quasi-isolé) → exemple de la propulsion d'une fusée (Dunod)
  - 2) Conservation du moment cinétique (pour un système isolé ou quasi-isolé) → application avec la chaise qui tourne (Feynman)
  - 3) Conservation de l'énergie mécanique (pour un système uniquement soumis à des forces conservatives, même les forces intérieures doivent être conservatives) → exemple avec le pendule pesant (manip)
- II) Application au mouvement d'un corps dans un champ de force central
  - 1) Position du problème
  - 2) Conservation du moment cinétique, mouvement plan, loi des aires
  - 3) Discussion énergétique (états de diffusion, états liés)
- III) Applications aux chocs et aux collisions
  - 1) Position du problème
  - 2) Collisions élastiques → exemple du pendule de Newton
  - 3) Collision inélastiques : exemple du refroidissement laser (Dangoisse)

Conclusion : sur l'importance des lois de conservations (qui ont permis de postuler l'existence du neutrino en physique des particules par exemple).

## LP 06 : Principes de la cinématique relativiste. Conséquences.

### Bibliographie :

- Bertin Faroux Renault : Mécanique 1
- Introduction à la relativité restreinte, Hladik

### Prérequis :

- Mécanique classique
- Électromagnétisme
- Interférences

### Plan :

Intro : historique sur les problèmes qui surviennent à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle pour unifier le principe de la relativité en mécanique et avec les lois de Maxwell.

#### I) Insuffisances de la théorie classique

- 1) La transformation de Galilée, loi de composition des vitesses, principe de relativité.
- 2) Les problèmes liés aux lois de Maxwell, montrer que la force de Lorentz magnétique n'est pas conservée par changement de référentiel et que les équations de Maxwell ne sont pas invariantes sous une transformation de Galilée.
- 3) Deux explications possibles : l'éther ou un abandon de la transformation de Galilée, expérience de Michelson et Morley.

#### II) Principes de la cinématique relativiste

- 1) Les postulats de la relativité restreinte.
- 2) La transformation spéciale de Lorentz Poincaré.
- 3) La transformation des vitesses, exemple de l'expérience de Fizeau.
- 4) L'invariance de l'intervalle.

#### III) Conséquences de la cinématique relativiste

- 1) Perte de la simultanéité, exemple du briquet qu'on allume dans un train.
- 2) Dilatation du temps.
- 3) Contraction des longueurs.

Conclusion : revenir sur le fait que les phénomènes relativistes ne se manifestent qu'à des vitesses proches de  $C$  (ce qui explique qu'on ne jette pas la mécanique classique à la poubelle), et qu'elle amène un certain nombre de phénomènes contre-intuitifs, mais vérifiés par l'expérience.

LP 07 : Dynamique relativiste. Exemples.

Bibliographie :

- Bertin Faroux Renault : Mécanique 1
- Introduction à la relativité restreinte, Hladik

Prérequis :

- Mécanique classique
- Électromagnétisme

Plan :

Intro : on a introduit la cinématique relativiste, mais c'est un outil purement descriptif (comme l'était la cinématique classique), il nous faut donc développer une théorie dynamique relativiste pour avoir accès à un caractère prédictif de la théorie.

I) Cadre de la dynamique relativiste

- 1) Les lois que l'on veut conserver en relativiste : un principe fondamental de la dynamique, la conservation de l'énergie totale, et de la quantité de mouvement totale si le système est isolé.
- 2) Expressions de la quantité de mouvement et de l'énergie en relativité restreinte, interprétation du terme d'énergie de repos  $mC^2$ , définition de l'énergie cinétique. Démontrer Pythagore-Einstein (sans le formalisme 4-vecteur) et l'expression de  $v$  en termes de  $E$  et  $p$ .
- 3) Deux conséquences simples : vitesse limite d'une particule accélérée (vérifiée expérimentalement) et équivalence masse-énergie.

II) Exemples d'utilisation des lois de conservation : collisions de particules

- 1) Collisions élastiques, angles de diffraction.
- 2) Collisions inélastiques, notion de seuil d'activation.

III) Exemples d'utilisation du principe fondamental de la dynamique : action de champs sur des particules chargées

- 1) Action d'un champ  $E$  constant sur une particule.
- 2) Action d'un champ  $B$  constant sur une particule.
- 3) Application aux cyclotrons et synchrotrons.

Conclusion : ouverture sur le formalisme 4-vecteur que l'on n'a pas utilisé ici pour mieux faire ressortir la physique des phénomènes, mais qui permet une approche systématique des problèmes de relativité.

LP 08 : Notion de viscosité d'un fluide. Écoulements visqueux, nombre de Reynolds, exemples simples.

Bibliographie :

- Cap Prépa PC
- Guyon Hulin Petit

Prérequis :

- Cinématique des fluides, hydrostatique
- Écoulements parfaits

Plan :

Intro : dire qu'on a déjà vu le modèle du fluide parfait, mais qu'on peut se rendre compte facilement qu'il y a des phénomènes dont on ne rend pas compte (faire ou présenter l'expérience de Couette avec un fluide visqueux et une force horizontale à la surface). Dire qu'on se limite aux écoulements incompressibles.

#### I) Notion de viscosité

- 1) Présentation de la force surfacique de viscosité, définition d'un fluide newtonien.
- 2) Calcul de la force volumique de viscosité, interprétation en termes de diffusion de quantité de mouvement, ordre de grandeur de viscosité cinématique.
- 3) Modèle microscopique de viscosité d'un gaz, dépendance en température, bien dire que pour le modèle fluide on a la dépendance inverse (cf. huile dans la poêle).

#### II) Écoulements visqueux

- 1) Équation de Navier-Stokes (la seule hypothèse est que l'écoulement est incompressible)
- 2) Écoulement de Couette plan.
- 3) Écoulement de Poiseuille cylindrique, application au viscosimètre.

#### III) Nombre de Reynolds, régimes d'écoulement

- 1) Nécessité de caractériser l'importance des différents termes de Navier-Stokes pour pouvoir simplifier l'équation qu'on ne sait pas résoudre dans le cas général, introduction de  $Re$ , interprétation en termes de rapport de temps de diffusion/convection.
- 2) Régimes d'écoulement : rampant (penser à dire qu'on est réversible temporellement), laminaire, turbulent (illustrer avec des images d'écoulement autour d'une sphère), tracé du coefficient de trainée en fonction du Reynolds.
- 3) Notion de couche limite, bien dire qu'à haut  $Re$ , on a toujours la viscosité qui joue un rôle, mais dans une zone d'épaisseur faible, la couche limite.

Conclusion : ouverture sur le fait qu'on peut faire le modèle du fluide parfait hors de la couche limite à  $Re$  suffisamment grand.

LP 09 : Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide, validité. Relation de Bernouilli, limites et applications.

Bibliographie :

- Cap Prépa PC
- Dunod PC
- Faroux-Renault, Mécanique des fluides, ondes mécanique.
- Guyon Hulin Petit

Prérequis :

- Cinématique des fluides
- Notion de viscosité d'un fluide, équation de Navier-Stokes, nombre de Reynolds

Plan :

Intro : dire qu'on a déjà vu l'équation de Navier-Stokes, qui ne possède pas (à l'heure actuelle) de solution générale, mais qu'on va voir que l'on peut, dans un certain nombre de cas, considérer que la viscosité joue un rôle négligeable.

I) Modèle de l'écoulement parfait

- 1) Cadre du modèle, différencier fluide parfait et écoulement parfait, donner des ordres de grandeur de nombres de Reynolds.
- 2) Equation d'Euler, décompte des variables (se restreindre au cas incompressible) et du nombre d'équation, importance des conditions aux limites.
- 3) Un premier exemple de l'application de l'équation d'Euler : effet Coanda (résolution dans le repaire de Frenet).

II) Equation de Bernouilli

- 1) Démonstration, différentes conditions de validité.
- 2) Interprétation énergétique de la relation de Bernouilli (elle traduit le fait que l'écoulement parfait est isentropique).
- 3) Applications de la relation de Bernouilli : vidange d'un siphon, effet Venturi (trompe à eau), tube de Pitot (mesure de pression)

III) Notion de couche limite

- 1) Exposition du paradoxe de d'Alembert, un fluide parfait glisse sur les obstacles, il n'y a aucune force de trainée qui s'exerce sur lui. En réalité, il y a une couche limite (d'autant plus petite que  $Re$  est grand) dans laquelle la viscosité joue (revenir sur le fait que dans le tube de Pitot on suppose que la pression n'est pas modifiée par cette couche limite).
- 2) Décollement de la couche limite à grand  $Re$ , non validité de l'équation d'Euler.

Conclusion : sur l'intérêt du profilage des obstacles, pour réduire au maximum la taille de la couche limite.

## LP 10 : Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides : applications.

### Bibliographie :

- Gouttes, bulles, perles et ondes
- Guyon Hulin Petit
- Diu Thermo (démonstration loi de Laplace)

### Prérequis :

- Mécanique des fluides
- Potentiels thermodynamiques

### Plan :

Intro : parler des gouttes, de la compétition entre les termes surfaciques et volumiques, dire qu'on va s'intéresser à des interfaces avec des fluides et qu'on pourra expliquer un grand nombre d'observations « courantes ».

#### I) Notion de tension de surface

- 1) Mise en évidence en termes de force linéique (déformation des films de savon attaché à une ficelle)
- 2) Interprétation en termes d'énergie de surface (travail à fournir pour déformer une interface), modèle microscopique (les particules « n'aiment pas » être à la surface, d'où le coût énergétique pour l'agrandir).
- 3) Une première conséquence : minimisation des surfaces, première approche de l'instabilité d'un tube de fluide.
- 4) Mesures de tension de surface → expérience de la balance d'arrachement (éventuellement la cuve à onde pour évoquer la dépendance éventuelle en la fréquence d'excitation, si du temps en préparation).

#### II) Contact air/liquide/solide

- 1) Mouillage (partiel et total).
- 2) Loi de Young-Dupré.

#### III) Loi de Laplace et applications.

- 1) Démonstration de la loi de Laplace (Diu), conséquence simple : les petites gouttes se vident dans les grosses.
- 2) Compétition gravité/capillarité : longueur capillaire.
- 3) Loi de Jurin (démonstration avec la pression).

#### IV) Instabilités

- 1) Instabilité de Rayleigh-Taylor (Guyon).
- 2) Retour sur l'instabilité de Rayleigh-Plateau (tube de fluide), établissement de la plus petite longueur d'onde de la perturbation instable.

Conclusion : ouverture sur le rôle de la capillarité à prendre en compte dans toute la micro et la nano-fluidique, qui sont des thèmes de recherche actuels.

LP 11 : Gaz parfait.

Bibliographie :

- Précis Bréal PCSI
- BFR Thermodynamique
- Cap prépa PCSI

Prérequis :

- Mécanique du point et des systèmes
- Notions de thermodynamique

Plan :

Intro : parler des observations expérimentales sur les comportements des gaz, qui vont permettre de construire un modèle microscopique pour justifier les équations d'état observées.

I) Modèle du gaz parfait

- 1) Présentation des résultats expérimentaux, tracé des diagrammes d'Amagat.
- 2) Énoncé des hypothèses du modèle (ne pas oublier de décrire le modèle de particules que l'on prend), justification du fait que les particules sont de taille petite devant la distance entre deux particules et que la densité peut être supposée uniforme sur des volumes raisonnables (les fluctuations de nombre de quelques particules ne seront pas gênantes car il y a beaucoup de particules dans un petit volume)
- 3) Existence d'une distribution de vitesse, présentation de la distribution de Maxwell, détermination expérimentale de la distribution de vitesse.
- 4) Vérification des autres hypothèses du modèle : particules non-relativistes, effet négligeable des collisions (qui sont nécessaires à la thermalisation).

II) Pression et température cinétique, obtention des équations d'état

- 1) Calcul de la pression cinétique.
- 2) Définition de la température cinétique, ordres de grandeur de vitesse (la vitesse reste plus faible que la vitesse de libération pour quitter l'attraction terrestre).
- 3) Première loi de Joule, expression de l'énergie, obtenue à partir de l'énergie cinétique, puis par théorème de l'équipartition, cas des gaz diatomiques, tracé de la capacité thermique en fonction de la température.

III) Limites du modèle

- 1) Amélioration du modèle, prise en compte de l'interaction entre particules, terme de volume exclu et pression de déplétion, équation de Van der Waals.
- 2) Gaz quantiques à très basse température.

Conclusion : ouverture sur les transitions de phase avec notamment l'équation de Van der Waals.

LP 12 : Fonctions d'état caractéristiques d'un système à l'équilibre thermodynamique.  
Identités thermodynamiques. Applications.

Bibliographie :

- Précis Bréal Thermodynamique PC-PSI
- Callen
- Faroux, Renault, Thermodynamique (pour le fil de fer)

Prérequis :

- U et S : 1<sup>er</sup> et 2<sup>nd</sup> principes de la thermodynamique
- Coefficients thermoélastiques, capacités calorifiques

Plan :

Intro : rappeler le cadre d'étude de la thermodynamique et les 1<sup>er</sup> et 2<sup>nd</sup> principes.

I) Fonctions d'états U et S

- 1) Définitions, fonction d'état, paramètre d'état, équation d'état, propriété des fonctions d'état : leur variation ne dépend pas du chemin suivi.
- 2) Identités thermodynamiques pour U et S, bien dire que U et S sont équivalentes car  $\frac{\partial U}{\partial S} = T > 0$ , donc on peut inverser  $U=U(S,V)$  en  $S=S(U,V)$ .
- 3) Notion de variables naturelles : les fonctions d'état doivent être exprimées dans un certain jeu de variables pour contenir toute l'information thermodynamique du système, exemple sur le gaz parfait avec  $S(U,V)$  et  $S(T,V)$ .
- 4) Une remarque sur l'obtention des fonctions d'état à partir des équations d'état : exemple de l'élastique (Callen), en profiter pour insister sur le fait que les variables ne sont pas toujours P, V, T.

II) Autres fonctions d'états et jeux de variables associés

- 1) Changement de variables sans pertes d'information, introduction de la transformation de Legendre
- 2) Un exemple d'utilisation de H : mesure d'une chaleur latente
- 3) Les « nouvelles » fonctions d'états contiennent bien toute l'information thermodynamique, exemple avec F sur l'exemple de l'élastique (Bréal)

III) Relations de Maxwell et applications

- 1) Exposition des relations de Maxwell, liens entre les différents coefficients thermoélastiques, formulations équivalentes des capacités calorifiques.
- 2) Calcul de la variation de l'allongement isentropique d'un fil de fer uniquement à partir des coefficients thermoélastiques et des relations de Maxwell (Faroux, Renault).

Conclusion : sur l'intérêt de l'utilisation de la bonne fonction d'état pour simplifier un problème thermodynamique, sachant que toutes contiennent la même information si elles sont exprimées dans les bons jeux de variables (mais certaines peuvent être plus pratiques que d'autres).

LP 13 : Évolution et condition d'équilibre d'un système thermodynamique fermé. Potentiels thermodynamiques. Exemples.

Bibliographie :

- Précis Bréal PCSI et PC
- Dunod PC
- Diu thermodynamique

Prérequis :

- Fonction d'état, identité thermodynamiques
- Premier et second principe

Plan :

Intro : on a déjà vu les fonctions thermodynamiques caractéristiques qui permettent de décrire complètement l'équilibre d'un système, nous allons nous intéresser aujourd'hui à l'évolution vers l'équilibre sous différentes contraintes, en introduisant un nouvel outil, les potentiels thermodynamiques.

- I) Notion de potentiel thermodynamique
  - 1) Cas d'un système isolé, négentropie, bien définir ce que sont les paramètres extérieurs (fixes) et les variables internes.
  - 2) Définition du potentiel thermodynamique : permet de prévoir l'évolution du système ( $-dS < 0$ ), et de trouver une condition d'équilibre stable ( $d^2S/d^2U > 0$ ).
- II) Potentiels thermodynamiques pour les systèmes en contact avec un réservoir
  - 1) Système en contact avec un thermostat.
  - 2) Exemple de la thermalisation d'un caillou avec un lac.
  - 3) Système en contact avec un thermostat et un pressostat.
- III) Exemples d'applications
  - 1) Recherche de l'équilibre : formule de Laplace.
  - 2) Travail maximum récupérable : détente d'une bouteille de gaz comprimé.
  - 3) Application à l'explication de la métastabilité des transitions de phase : nucléation.

Conclusion : conclusion sur l'intérêt des potentiels thermodynamiques pour leur caractère prédictif, à condition de choisir celui adapté au système que l'on considère.

## LP 14 : Thermodynamique des phénomènes irréversibles.

### Bibliographie :

- Précis Bréal PCSI
- Cap prépa sup
- Latour
- Lhuillier
- Diu (pour les définitions)

### Prérequis :

- Premier et second principes de la thermodynamique
- Gaz parfait

### Plan :

Intro : les lois de la mécanique classique sont réversibles dans le temps, alors que l'on observe couramment des phénomènes irréversibles, nous allons étudier l'irréversibilité à l'aide de la thermodynamique, et en particulier de la fonction d'état entropie.

#### I) Notion d'irréversibilité

- 1) Introduction « avec les mains » à l'aide du processus « film inversé ».
- 2) Définitions : quasistatique, réversible, irréversible.
- 3) Un premier exemple : approche entropique de la détente de Joule Gay-Lussac.
- 4) Critère d'irréversibilité :  $S_c > 0$ , méthode générale de calcul de  $S_c$  (calcul de  $S_e$  et connaissance de  $\Delta S$  par la formule de  $S$ ).
- 5) Une conséquence simple : sens des échanges de chaleur.

#### II) Les causes d'irréversibilité

- 1) De façon générale : toute inhomogénéité de grandeur intensive (entraîne de la diffusion) ou tout phénomène dissipatif.
- 2) Inhomogénéité de température : exemple du contact entre deux solides de température différente.
- 3) Inhomogénéité de la densité de particules : parler de la détente de Joule Gay-Lussac, calcul de l'entropie de mélange avec 2 gaz en contact à T et P fixés.
- 4) Présence de frottement : calcul de l'entropie créée pour deux solides en contact dans un gaz qui sert de thermostat.
- 5) Hystérésis.

#### III) Approche de la réversibilité

- 1) Fractionnement de l'équilibre thermique entre un solide et un thermostat (caillou dans un lac) : réversibilité approchable.
- 2) Fractionnement de la détente de Joule Gay-Lussac : irréversibilité conservée.

Conclusion : revenir sur la distinction quasistatique et réversible, ouvrir sur l'étude des phénomènes faiblement hors d'équilibre (équation de diffusion).

LP 15 : Application des deux premiers principes de la thermodynamique au fonctionnement des machines thermiques.

Bibliographie :

- Précis Bréal PCSI
- Cap Prépa Sup
- BUP 832
- Ray, La physique des objets quotidiens
- Éventuellement : Garing, les 1001 questions de la physique en prépa

Prérequis :

- Premier et second principes de la thermodynamique
- Changement d'état du corps pur

Plan :

Intro : historiquement c'est l'étude des machines thermiques qui a amené à la construction de la thermodynamique (en particulier le premier énoncé du second principe y fait directement référence), nous allons aujourd'hui partir de nos connaissances théoriques pour les étudier.

I) Les machines thermiques

- 1) Modélisation, système en contact avec des sources de chaleur et de travail, système fermé au fonctionnement cyclique.
- 2) Application du premier principe.
- 3) Application du second principe, impossibilité d'avoir un moteur monotherme, classification des différents régimes de fonctionnement des machines dithermes (moteur, réfrigérateur, pompe à chaleur, et « accélérateur du transfert de chaleur normal »), éventuellement présenter le diagramme de Raveau qui résume (Garing).
- 4) Rendement et efficacité, théorème de Carnot (pour le moteur, la pompe à chaleur et le réfrigérateur), bien dire que pour avoir un fonctionnement réversible les échanges de chaleur doivent se faire à  $T=T_{\text{source}}$  (cycle de Carnot), calcul du travail reçu dans les diagramme (T,S) et (P,V).

II) Étude d'un moteur : le cycle de Beau de Rochas

- 1) Principe de fonctionnement, étapes du cycle.
- 2) Calcul du rendement (ne pas tout détailler).

III) Étude du fonctionnement d'un réfrigérateur à compresseur

- 1) Principe de fonctionnement.
- 2) Construction du cycle dans le diagramme PV.
- 3) Calcul du rendement, le comparer au rendement de la machine de Carnot équivalente.

Conclusion : ouverture sur les nombreux autres types de cycles des machines thermiques (cycle de Stirling par exemple).

LP 16 : Etude thermodynamique d'un corps pur sous plusieurs phases. Exemples.

Bibliographie :

- Callen
- Diu Thermo
- Tec & Doc (sulfusion de l'étain), éventuellement Hprépa
- Latour (pour le bouillant de Franklin)

Prérequis :

- Potentiels thermodynamiques
- Modèle du gaz de Van der Waals

Plan :

Intro : existence de la matière sous plusieurs formes, dans l'expérience de tous les jours.

I) Equilibre entre phases et transition

- 1) Exemple introductif : bouillant de Franklin → explication à partir du diagramme PT de l'eau (donner des OdG pour d'autres transitions, et des exemples de la vie courante : cocotte minute, linge qui sèche).
- 2) Règle de la variance de Gibbs → ne permet pas de tout déterminer
- 3) Interprétation en terme de minimum du potentiel G, condition de coexistence, évolution spontanée (courbes dans le Callen, calculs dans le Diu, à mettre en regard).

II) Propriétés générales des transitions de phase

- 1) Transitions du 1<sup>er</sup> et du 2<sup>nd</sup> ordre
- 2) Caractéristique du premier ordre : discontinuité de l'entropie molaire (cf. courbes Callen), chaleur latente, interprétation → ODG
- 3) Formule de Clapeyron

III) Un exemple de transition du 1<sup>er</sup> ordre : le fluide de Van der Waals

- 1) Position du problème : tracé des isothermes, mise en évidence de la température critique.
- 2) Critère de stabilité, possibilité de remonter au potentiel chimique par intégration, construction de la zone de coexistence, isotherme « physique »
- 3) Introduction aux états métastables

IV) Un autre exemple de métastabilité : sulfusion de l'étain

- 1) Explication à partir des courbes de G

Conclusion : ouverture sur les transitions du second ordre, la « nouvelle classification » en terme de paramètre d'ordre, de rupture de symétrie, de groupe de normalisation (si on est méga chaud).

LP 17 : Notion d'état microscopique. Interprétation statistique de l'entropie. Exemples.

Bibliographie :

- BFR thermodynamique
- Diu phystat
- Callen

Prérequis :

- Gaz parfait
- Détente de Joule Gay-Lussac
- Bases de mécanique quantique
- Bases de probabilités et statistiques

Plan :

Intro : on a introduit un certain nombre de grandeurs en thermodynamique, qui ont toute une interprétation physique, sauf l'entropie, on va construire un modèle microscopique statistique qui va permettre de dégager une interprétation de l'entropie.

I) Micro-état, macro-état.

- 1) Définitions du micro-état et du macro-état (défini à partir d'un petit jeu de paramètres qui sont des valeurs moyennes), illustration du fait que plusieurs micro-état peuvent être compatibles avec un macro-état donné sur l'exemple du polymère 1D, définition de micro-état accessible.
- 2) Le postulat de la mécanique statistique : pour un système isolé, tous les micro-états sont équiprobables.
- 3) Une illustration de la loi des grands nombres, justification du traitement en termes de moyenne. Exemple d'un système constitué de  $N$  systèmes à 2 niveaux, calcul de la probabilité d'un macro-état sachant que tous les micro-états sont équiprobables (plus  $N$  est grand, plus la distribution est piquée autour de la moyenne).
- 4) L'hypothèse ergodique : on a en général qu'un seul système et pas une collection statistique de système.
- 5) Les « vrais » micro-états, classiques ( $r$  et  $p$ ) et quantique (état « pur »).

II) Définition statistique de l'entropie.

- 1) Exemple de la détente de Joule Gay-Lussac, justification de la forme  $S = k_b \ln(\Omega)$  pour un système isolé, définition de la température micro-canonique.
- 2) Exemple du système à deux niveaux, tracé de  $E$  en fonction de  $T$ .
- 3) Exemple du gaz parfait, paradoxe de Gibbs, nécessité de rajouter l'indiscernabilité des particules pour retrouver  $S$  du gaz parfait.

III) Entropie et théorie de l'information.

- 1) Propriétés nécessaire d'une grandeur mesurant le désordre.
- 2) Entropie de Shannon, justification de  $S = k_b \ln(\Omega)$  en microcanonique.

Conclusion : ouverture sur l'étude de systèmes non isolés.

LP 18 : Introduction au facteur de Boltzmann à partir d'un exemple au choix.

Bibliographie :

- BFR thermodynamique
- Diu phystat
- Callen

Prérequis :

- Ensemble microcanonique
- Statique des fluides
- Gaz parfait

Plan :

Intro : faire un bref rappel sur ce qu'on a vu pour l'ensemble microcanonique (entropie de Shannon pour un système isolé), dire qu'on va s'intéresser maintenant aux propriétés statistiques d'un système en contact avec un thermostat.

- I) Un premier exemple : l'atmosphère isotherme.
  - 1) Rappel d'hydrostatique.
  - 2) Calcul de la densité en fonction de l'altitude.
  - 3) Interprétation en termes de « probabilité de présence » des particules de gaz, compétition entre la gravité et l'agitation thermique.
  - 4) Définition du facteur de Boltzmann, qui correspond à la probabilité d'occuper un état d'énergie donnée, lorsque le système est en contact avec un thermostat.
- II) Généralisation : ensemble canonique
  - 1) Construction de l'ensemble canonique à partir d'un système isolé constitué d'un thermostat et du système d'intérêt, utilisation de l'entropie microcanonique pour faire apparaître le facteur de Boltzmann, définition de la fonction de partition.
  - 2) Un premier exemple : paramagnétisme, chaîne de spins, calcul de l'aimantation moyenne en présence d'un champ magnétique.
  - 3) Un autre exemple : gaz diatomique, calcul de l'énergie moyenne et de la capacité thermique à volume constant.
- III) Passage au continu et limite classique
  - 1) Passage à une distribution continue d'énergie, condition de validité, interprétation de l'état d'énergie la plus probable en terme de température microcanonique.
  - 2) Passage à une fonction de partition classique, conditions de validité.
  - 3) Théorème de l'équipartition de l'énergie, retour sur le gaz diatomique.

Conclusion : ouverture sur les statistiques quantiques (Bose-Einstein et Fermi-Dirac).

LP 19 : Rayonnement d'équilibre thermique. Corps noir. Applications aux transferts thermiques radiatifs.

Bibliographie :

- HPrépa Thermodynamique MP
- Gié Thermodynamique
- Quaranta Thermo

Prérequis :

- Notion de flux
- Notions d'électromagnétisme
- Équilibre thermodynamique

Plan :

Intro : existence d'un transfert thermique qui n'est ni de la conduction ni de la diffusion (exemple des braises qui brûlent quand on s'approche, alors que l'air en lui-même n'est pas particulièrement chaud).

I) Rayonnement d'équilibre thermique

- 1) Origine du rayonnement.
- 2) Définition des différents flux, et des différents types de milieux (transparent, réfléchissant, corps noir).
- 3) Définition du rayonnement d'équilibre thermique (la condition d'équilibre radiatif est moins forte que la condition d'équilibre thermodynamique)

II) Loi de Planck et conséquences

- 1) Présentation historique des lois du rayonnement à l'équilibre radiatif et thermique. Lien entre la densité volumique d'énergie et le flux surfacique.
- 2) Démonstration de la de déplacement de Wien (exemple du filament qui change de couleur en chauffant).
- 3) Démonstration de la loi de Stefan.

III) Le cas du corps noir.

- 1) Application de la loi de Planck dans le cas du corps noir (différence avec les autres matériaux).
- 2) Réalisation pratique, approximation pour les corps pas tout à fait noirs.
- 3) Principe du pyromètre optique.

IV) Étude de l'effet de serre

- 1) Calcul de la température terrestre sans prise en compte de l'atmosphère.
- 2) Calcul de la température terrestre avec un modèle d'atmosphère.

Conclusion : ouverture sur les applications en astrophysique, mesure de la température des étoiles à distance.

## LP 20 : Phénomènes de transports. Illustrations.

### Bibliographie :

- Précis Bréal PC
- Cap Prépa PC
- Diu Thermodynamique
- Diu Physique Statistique

### Prérequis :

- Équilibre thermodynamique
- Conduction électrique
- Fluide visqueux, Navier-Stokes

### Plan :

Intro : décrire les différents types de transport avec une petite expérience (mettre une goutte de liquide coloré dans un bécher rempli d'eau), illustrer la diffusion (laisser la tache s'étaler, sans mouvement macroscopique) et la convection (agiter avec une baguette de verre).

#### I) Cadre d'étude des phénomènes de transport de type diffusif

- 1) Origine microscopique du transport diffusif, petit modèle avec l'agitation thermique, pour montrer l'existence d'un flux dans le sens inverse du gradient de concentration.
- 2) Nécessité de l'équilibre thermodynamique local pour une étude rigoureuse.
- 3) Cas d'étude : ETL + équation de conservation + expression d'un flux comme un développement limité à l'ordre 1 d'une grandeur non homogène.

#### II) Exemples de phénomènes diffusifs

- 1) Diffusion de particule, conservation du nombre de particule et loi de Fick.
- 2) Diffusion de chaleur, conservation de l'énergie et loi de Fourier (montrer les petits barreaux métalliques qui permettent de visualiser le flux de chaleur).
- 3) L'équation de la diffusion, propriétés : linéarité, non symétrique par rapport au temps, expression de la solution analytique, importance du coefficient de diffusion, interprétation en termes de distance ou de temps caractéristique.
- 4) Interprétation en termes de marche aléatoire : calcul de la moyenne et de l'écart type d'une particule soumise à l'agitation brownienne (modélisée par une marche aléatoire).
- 5) Une remarque sur la conduction thermique : il n'y a pas de diffusion des charges

#### III) Applications

- 1) Température de contact, effusivité thermique.
- 2) Taille de la couche limite visqueuse dans un écoulement.

Conclusion : tableau comparatif des différents phénomènes diffusifs abordés dans cette leçon, éventuellement ouvrir sur les flux « croisés » (théorie d'Onsager).

## LP 21 : Conversion de puissance électromécanique. Exemples et applications.

### Bibliographie :

- HPrépa Électronique 2
- Précis Bréal Électrotechnique
- BUP 846

### Prérequis :

- Equation de Maxwell, Induction
- Forces de Lorentz et Laplace

### Plan :

Intro : la conversion de puissance électro-mécanique est quelque chose que l'on rencontre désormais tous les jours (tous les appareils munis d'un moteur électrique) nous allons en étudier le fonctionnement de base à partir de notre connaissance des lois de l'induction.

#### I) La conversion de puissance électro-mécanique

- 1) Bilan de puissance sur un circuit soumis à l'induction de Lorentz, on a une conversion de la puissance électrique en puissance mécanique et réciproquement.
- 2) Application au rail de Laplace, rendement théorique de 1, modélisation un peu plus fine du bilan de puissance en fonctionnement moteur et générateur, définition du rendement « réel ».

#### II) Application, la machine à courant continu.

- 1) Description de la structure (induit, inducteur, stator, rotor), faire l'analogie avec un rail de Laplace en géométrie cylindrique. Nécessité de renverser le courant tous les demi-tours (sinon la machine se bloque), en pratique réalisé par un système de balais et de collecteurs (indispensable au fonctionnement), maintien d'un champ B radial par l'utilisation d'un matériau ferromagnétique.
- 2) Différents types de branchement, on ne va s'intéresser qu'au modèle « à excitation indépendantes » (l'induit et l'inducteur sont séparés).
- 3) Calcul du couple (Bréal) en fonction du courant, en déduire la f.e.m en fonction de la vitesse de rotation.
- 4) Équations en régime variable (les poser rapidement), discuter le démarrage, tracé d'un point de fonctionnement, rendement réel, OdG.

#### III) Applications, machines à champ tournant.

- 1) Production d'un champ tournant.
- 2) Machine synchrone, calcul du couple moyen, nécessite d'être « lancée » au démarrage, point de fonctionnement (discuter la stabilité), notion de charge limite.
- 3) Machine asynchrone, principe de fonctionnement, expression du couple (la donner), discuter sur la courbe les différents régimes de fonctionnement.

Conclusion : comparaison/récapitulatif des trois moteurs, on aurait également pu parler du haut-parleur, qui est un transducteur électromécanique.

## LP 22 : Induction électromagnétique. Applications.

### Bibliographie :

- Cap Prépa PC ou MP
- Mauras électromagnétisme
- Garing magnétisme, statique, induction et milieu.

### Prérequis :

- Equations de Maxwell, forces de Lorentz et Laplace
- ARQS
- Électrocinétique

### Plan :

Intro : on a vu qu'il existait un couplage entre les champs électriques et magnétiques, on va étudier une des conséquences de ce couplage : l'induction, qui va nous permettre d'expliquer un certain nombre de phénomènes, en particulier le comportement des bobines.

#### I) Induction : un phénomène, deux cas limites.

- 1) Introduction sur l'induction de Neumann, définition « restreinte » du champ électromoteur, calcul énergétique sur une charge dans un circuit fermé (permet de faire ressortir le fait que la variation de  $B$  induit une f.e.m.), loi de Faraday.
- 2) Loi de Lenz, le courant induit crée un champ qui s'oppose à la variation de flux. Manipulation avec une bobine et un aimant. Faire remarquer qu'on pourrait déplacer la bobine à la place de l'aimant.
- 3) Transformation des champs par changement de référentiel dans la limite non-relativiste, expression du champ électromoteur total, second cas limite, induction de Lorentz, démonstration de la loi de Faraday dans ce cas.
- 4) Expression générale de la loi de Faraday (dans le cas d'un circuit indéformable).

#### II) Applications

- 1) Induction de Neumann : auto-inductance et mutuelle inductance. Calcul dans le cas d'un solénoïde où on néglige les effets de bord, explication du comportement électrocinétique d'une bobine (Mauras).
- 2) Le transformateur idéal.
- 3) Induction de Lorentz : rail de Laplace, mise en évidence de la loi de Lenz, freinage du rail (Garing).
- 4) Le principe de la machine à courant continu, bilan de puissance sur le rail de Laplace, illustration de la conversion de puissance électromécanique.
- 5) Si temps : courants volumique, courants de Foucault et chauffage par induction (Garing).

Conclusion : ouverture sur l'étude plus générale des transducteurs électromécanique, avec par exemple l'étude du moteur asynchrone.

LP 23 : Résonance magnétique. Exemples et applications.

Bibliographie :

- Cohen-Tannoudji : mécanique quantique I
- Atkins : chimie physique (pour la RMN et les temps de relaxation)
- Cagnac : physique atomique (pour les équations de Bloch)

Prérequis :

- Electromagnétisme
- Bases de mécanique quantique
- Facteur de Boltzmann
- Facteur gyromagnétique

Plan :

Intro : réexploitation de notions vues dans différents cours pour expliquer un phénomène qui a de nombreuses applications (chimie, médecine) : la résonance magnétique.

- I) Action d'un champ magnétique sur un moment magnétique
  - 1) Approche classique, précession de Larmor
  - 2) Approche quantique (sur transparent), formule de Rabi
  - 3) Lien entre les deux, évolution du moment magnétique moyen
- II) Application à la spectroscopie par RMN
  - 1) Principe : dégénérescence des niveaux énergétiques sous l'action d'un champ magnétique (OdG)
  - 2) Effet de l'environnement protonique sur la fréquence de résonance
  - 3) Population des états, critères d'une résonance marquée
  - 4) Exemples de spectres RMN en chimie, déplacement chimique
- III) Etude plus quantitative : équations de Bloch
  - 1) Détection de la résonance : mesure d'une aimantation moyenne dans le plan XY (dispositif expérimental)
  - 2) Relaxations de l'aimantation → temps caractéristiques de décroissance (modèles de relaxation, spin/réseau et spin/spin)
  - 3) Equations de Bloch, solutions stationnaires → facteur de qualité

Conclusion : ouverture sur la RMN pulsée (qui permet de ne pas avoir besoin de faire un balayage en fréquence mais de remonter à la fréquence de résonance à partir de la réponse impulsionnelle et de la transformée de Fourier).

NB : On peut éventuellement faire la résonance paramagnétique de l'électron (il y a un appareil Jeulin dans la collection pour la réaliser).

LP 24 : Système bouclés. Applications.

Bibliographie :

- Automatique, Granjon (Dunod)
- Duffait électronique
- Introduction à l'électronique, Donnini et Quaranta
- (Krobb électronique)

Prérequis :

- Systèmes linéaires
- Transformée de Laplace
- Composants électroniques (AO)
- Machine à courant continu

Plan :

Intro : importance de l'asservissement pour des usages quotidiens (chauffage, pilotage de véhicule, etc.).

I) Systèmes bouclés

- 1) Systèmes Linéaires Indépendants du Temps
- 2) Intérêt du bouclage (rôle des fluctuations) → AO
- 3) Critères de stabilité : algébrique et graphique (Nyquist) → parler des deux fonctionnements « asservi » (stable) et « oscillateur » (instable).

II) Un exemple d'oscillateur : oscillateur à pont de Wien

- 1) Généralités, critère de Barkhausen
- 2) Description du montage
- 3) Différents domaines : pas d'oscillation, quasi-sinusoidal, non-linéaire → tracé des diagrammes de phase

III) Un exemple de système asservi : asservissement en position

- 1) Présentation du problème
- 2) Description du montage
- 3) Caractéristiques d'un système asservi : précision (erreur statique), temps de réponse, dépassement → illustrations expérimentales

Conclusion : ouverture sur les systèmes bouclés numériques.

LP 26 : Exemples de phénomènes de propagation unidimensionnels. Ondes progressives, ondes stationnaires. Aspects énergétiques.

Bibliographie :

- HPrépa Ondes
- Cap Prépa PC
- Garing Ondes mécaniques et diffusion

Prérequis :

- Mécanique
- Électrocinétique

Plan :

Intro : définition intuitive et rigoureuse de ce qu'est « une onde » en physique, ce qu'on va chercher à modéliser aujourd'hui, en se limitant pour l'instant à une propagation unidimensionnelle.

I) Différents modèles, une unique équation

- 1) Modélisation de la propagation d'une onde dans une corde de Melde (bien faire les hypothèses), obtention de l'équation de d'Alembert avec une vitesse caractéristique, on peut également noter l'existence de deux équations couplées, bien dire qu'on a ici une onde transverse mais qu'on pourrait avoir une onde longitudinale (dans le cas de la compression d'un solide par ex.)
- 2) Modélisation de la propagation d'une onde dans un câble coaxial à partir du modèle à constante réparties, analogies.

II) Résolution de l'équation de d'Alembert

- 1) Solution générale, interprétation en termes de superposition de deux ondes progressives dans des sens inverses.
- 2) Notion d'impédance, pour une onde progressive unique, lien entre les deux grandeurs couplées (relation claire dans le cas du coaxe).
- 3) OPPH, une base des solutions (via la décomposition en série de Fourier)
- 4) Les ondes stationnaires, une autre base des solutions (montrer l'équivalence entre les deux bases).
- 5) Un exemple : choix de la base en fonction du problème, conditions aux limites et ondes stationnaires, cas de la résonance de la corde de Melde.

III) Aspect énergétique

- 1) Vitesse de propagation de l'énergie : cas du câble coaxe, bilan local de conservation de l'énergie (définition du « flux » et de l'énergie volumique).
- 2) Cas des ondes stationnaires, énergie totale comme somme de l'énergie contenue dans chacun des modes (calculs pour la corde de Melde).

Conclusion : ouverture vers la richesse de la physique des ondes, ondes dans les fluides, ondes ELM, dispersion, absorption, etc.

LP 27 : Ondes acoustiques dans les fluides.

Bibliographie :

- Cap Prépa PC (quasiment suffisant à lui seul)
- Garing Ondes mécaniques et diffusion
- Ray, « Physique des objets quotidiens »

Prérequis :

- Ondes unidimensionnelles
- Thermodynamique

Plan :

Intro : on va s'intéresser à la propagation d'une onde acoustique dans un fluide, un phénomène très couramment rencontré, et qui vous permet d'ailleurs de m'entendre en ce moment même.

#### I) Modèle et mise en équation

- 1) Expérience introductive : visualisation à l'oscilloscope du caractère ondulatoire d'une onde sonore reçue par un microphone.
- 2) Onde de surpression, approximation acoustique (OdG), équation d'Euler et équation de conservation de la masse.
- 3) Modèle du fluide isentropique, discuter les ordres de grandeur (domaine de validité en fréquence).
- 4) Équation d'onde, vitesse caractéristique (la mesurer dans l'air, vérifier que ça correspond à la prédiction théorique).

#### II) Solutions de l'équation

- 1) Solutions particulières : OPPH.
- 2) Impédance, lien entre la vitesse et la pression, l'onde sonore est une onde de compression.
- 3) Ondes stationnaires, conditions aux limites dans un tuyau acoustique, modes propres de vibration.
- 4) Bilan énergétique, construction de la densité d'énergie à partir de la conservation de l'énergie et de l'expression du « flux de puissance ».
- 5) Intensité sonore, définition, seuil de détection et seuil de douleur.

#### III) Réflexion et transmission à l'interface entre deux milieux

- 1) Mise en équation, relations de continuité.
- 2) Coefficients de réflexion et de transmission en pression et en énergie, discussion dans le cas d'un milieu d'impédance infinie ou nulle (paroi rigide ou surface libre en sortie d'un tuyau acoustique)
- 3) Adaptation d'impédance, cas de l'échographie (éventuellement cloche à vide).

Conclusion : ouverture sur l'étude des instruments de musique (si très motivé), sinon vers les autres phénomènes ondulatoires.

LP 28 : Propagation dans un milieu dispersif : vitesse de phase, vitesse de groupe. Paquets d'ondes planes et évolution. Exemples.

Bibliographie :

- Sanz, tout en un physique, PC-PC\*
- Cap prépa PC
- Tec et Doc PC

Prérequis :

- Équation d'onde
- Equation de Maxwell
- Optique géométrique

Plan :

Intro : on a déjà étudié les solutions en ondes planes de l'équation de d'Alembert, qui fait sortir une vitesse de propagation constante, nous allons désormais étudier le cas d'un milieu dispersif, c'est-à-dire où la vitesse de propagation dépend de la fréquence (exemple introductif du prisme).

- I) Introduction des concepts sur l'exemple de la chaîne d'oscillateurs
  - 1) Modélisation (ne pas passer trop de temps dessus).
  - 2) Interprétation de la dispersion et de l'absorption pour une onde plane.
  - 3) Définition de vitesse de phase et vitesse de groupe.
- II) Le paquet d'onde et l'interprétation de la vitesse de groupe
  - 1) Nécessité du paquet d'onde pour un signal « physique » (l'onde plane existe partout et tout le temps).
  - 2) Milieu faiblement dispersif, vitesse de groupe comme vitesse de déplacement du paquet d'onde, propagation de l'énergie.
  - 3) Milieu fortement dispersif, déformation du paquet d'onde, exemple de la fibre optique (pour bien faire sentir le fait que le signal va être déformé).
- III) Ondes électromagnétiques dans les plasmas
  - 1) Modélisation (bien faire ressortir le fait que le milieu n'a pas le même comportement selon la fréquence de l'onde, on peut être transparent pour une certaine fréquence et réfléchissant pour une autre).
  - 2) Vitesse de groupe, vitesse de phase.
  - 3) Prise en compte pour le positionnement GPS.

Conclusion : ouverture sur la propagation guidée, donc on a montré ici rapidement qu'elle était dispersive, mais qui a de nombreuses autres propriétés.

## LP 29 : Propagation guidée. Exemples et applications.

### Bibliographie :

- Sanz, tout en un physique, PC-PC\*
- Cap prépa MP
- Taillet, Optique physique
- Garing, Ondes 2

### Prérequis :

- Equation de Maxwell, propagation d'une onde ELM dans le vide et les diélectriques
- Ondes acoustiques
- Optique géométrique

### Plan :

Intro : propagation libre atténuée rapidement pour des ondes sphériques (en  $1/r^2$  pour la puissance), manque de directivité, en utilisant des conditions aux limites dans un guide d'onde on va pouvoir forcer la direction de propagation d'une onde.

#### I) Onde électromagnétique dans un guide d'onde rectangulaire

- 1) Position du problème, recherche de mode TE, pour simplifier on prend 2 plans infinis (on étendra les résultats au guide d'onde rectangulaire après).
- 2) Calcul du champ E, interprétation en termes de superposition de deux ondes progressives, existence de modes quantifiés, relation de dispersion, vitesse de phase, dispersion intra et inter modale.
- 3) Calcul du champ B résultant (montrer qu'on n'a plus les relations simples qu'on avait dans la propagation libre), calcul du vecteur de Poynting, point de vue énergétique, vitesse de groupe.
- 4) Revenir sur les points importants : conditions aux limites, mode quantifiés, dispersion, bien dire qu'on a négligé l'absorption, mais qu'a priori elle existe (et atténue l'onde le long de sa propagation).

#### II) Fibre optique : approche géométrique

- 1) Description du problème
- 2) Condition de réflexion totale, condition de réflexions en phase, existence des modes
- 3) Mise en évidence de la dispersion inter modale sur cet exemple simple
- 4) Limitations, un mot sur les fibres à gradient d'indice

#### III) Canal SOFAR (sound fixing and ranging) : guide d'onde acoustique

- 1) Présentation de la courbe de vitesse du son en fonction de la profondeur (minimum vers -0,5 à -1 km), explication du phénomène « guide d'onde » avec les mains (courbure du front d'onde)
- 2) Utilisation par les baleines et pour surveiller l'activité sismique aux Açores (triangulation pour remonter à l'épicentre)

Conclusion : ouverture sur les télécommunications.

LP 30 : Dispersion et absorption d'une onde électromagnétique plane dans un milieu diélectrique. Modèle microscopique.

Bibliographie :

- Cap Prépa PC
- Mauras Électromagnétisme
- Garing Milieux diélectriques

Prérequis :

- Équations de Maxwell, propagation des ondes dans le vide
- Électrostatique

Plan :

Intro : on a déjà étudié la propagation des ondes électromagnétiques dans le vide et les matériaux conducteurs, cependant on ne s'est pas encore intéressé à des matériaux isolants qui sont pourtant d'usage courant, tel que le verre par exemple.

#### I) Propriétés d'un milieu diélectrique

- 1) Expérience introductive, lorsqu'on introduit une plaque de verre entre les armatures d'un condensateur d'Aepinus, on voit la capacité augmenter, ce qui signifie qu'à charge fixée, la ddp à ses bornes a chuté → polarisation du matériau.
- 2) Densité volumique de moment dipolaire, densité de charge et de courant associées.
- 3) Équations de Maxwell dans un milieu diélectrique, nécessité d'une équation supplémentaire pour résoudre le problème.

#### II) Modélisation microscopique pour un DLHI

- 1) Différents types de polarisations.
- 2) Polarisation électronique, modèle de l'électron élastiquement lié.
- 3) Un mot sur le cas des autres types de polarisation (Mauras).

#### III) Propagation d'une onde électromagnétique dans un DLHI

- 1) Relation de dispersion, définition des indices réel et complexe, dispersion et absorption, discussion sur le cas du modèle de l'électron élastiquement lié des différents comportements du milieu selon la fréquence de l'onde.
- 2) Loi de Cauchy (déviations avec un prisme).
- 3) Loi de Lambert (application à Beer Lambert).
- 4) Transmission et réflexion à l'interface entre deux milieux, lois de Snell-Descartes.

Conclusion : ouverture sur des applications, comme le four micro-onde (voir par exemple « Physique des objets quotidiens » de Ray) par exemple.

LP 31 : Effet de peau. Comportement d'une onde électromagnétique à la surface d'un conducteur.

Bibliographie :

- Cap Prépa PC ou MP
- Mauras électromagnétisme
- Garing ELM dans le vide et les conducteurs.

Prérequis :

- Equations de Maxwell, propagation des ondes dans le vide
- Relations de passage des champs à une interface

Plan :

Intro : on a étudié les ondes électromagnétiques dans le vide, on va maintenant s'intéresser à leur comportement dans un conducteur, et à leur comportement à une interface entre « le vide » (ou un milieu assimilé) et un conducteur, ce qui nous permettra d'expliquer certaines caractéristiques des métaux.

I) Modèle du conducteur.

- 1) Modèle de Drude.
- 2) Loi d'Ohm locale en régime sinusoïdal forcé, OdG pour le cuivre (éventuellement quelques autres métaux).
- 3) Neutralité locale du conducteur (Cap prépa), vérification de la validité dans l'hypothèse des fréquences faibles devant  $1/\tau$ .

II) Équations de Maxwell dans un conducteur.

- 1) Hypothèse supplémentaire de l'ARQS magnétique, courant dû à la dérivée de E négligeable devant le courant de conduction (vérification de la validité dans le cas des fréquences faibles).
- 2) Équation de diffusion pour le champ E.
- 3) Recherche d'une solution sinusoïdale forcée, relation de dispersion, forme du champ E obtenu, interprétation physique de la longueur de peau.
- 4) Exemple d'un conducteur de cuivre cylindrique (Garing) : impossibilité du transport d'ondes à haute fréquence dans un conducteur classique.
- 5) Considération énergétique : calcul du vecteur de Poynting et de la puissance dissipée par effet Joule dans un conducteur en régime forcé : aucune énergie n'est stockée dans le conducteur (Cap Prépa).

III) Transmission et réflexion à l'interface vide/métal

- 1) Cas d'un conducteur « quelconque », liste des champs réfléchis/transmis, utilisation des relations de continuité (absence de courant surfacique), coefficients de réflexion/transmission.
- 2) Cas limite du conducteur parfait, calcul des densités surfaciques de charge et de courant.

Conclusion : ouverture sur le calcul général de la relation de dispersion dans un conducteur qui permet de mettre en évidence différents régimes (transparent, réfléchissant, etc.). (Garing)

## LP 32 : Propriétés et applications du rayonnement dipolaire.

### Bibliographie :

- Cap Prépa PC
- Hprépa Ondes
- Garing ELM dans le vide et les milieux
- Sextant

### Prérequis :

- Equations de Maxwell, ondes planes dans le vide
- Optique ondulatoire, polarisation
- Modèle de l'électron élastiquement lié

### Plan :

Intro : on a étudié la propagation des ondes ELM dans le vide, cependant on n'a pas encore vu comment produire de telles ondes. On va voir qu'une distribution de charge accélérée va rayonner un champ électromagnétique, et on va l'appliquer à la fabrication d'antennes.

#### I) Propriétés du rayonnement dipolaire

- 1) Distribution de charge, moment dipolaire.
- 2) Potentiels retardés, approximation dipolaire et hypothèse du « petit » dipôle.
- 3) Calcul du potentiel vecteur, on en déduit le champ magnétique, puis le champ électrique via les équations de Maxwell.
- 4) Simplification des expressions : zone de champ proche (on retrouve le champ dipolaire électrostatique) et de champ lointain (rayonnement dipolaire), faire remarquer l'anisotropie, le caractère localement plan de l'onde.
- 5) Considérations énergétiques : calcul du vecteur de Poynting, tracé du diagramme de rayonnement, calcul de la puissance rayonnée à travers une sphère de rayon  $R$ , le dipôle cède de l'énergie (freinage).

#### II) Applications aux antennes

- 1) Description d'une antenne.
- 2) Antennes petites devant la longueur d'onde.
- 3) Antennes grandes devant la longueur d'onde, l'hypothèse du « petit » dipôle n'est plus valable, calcul intégral du champ, possibilité d'une directivité sélective.
- 4) Eventuellement : applications du rayonnement à la production de rayons X

#### III) Rayonnement dipolaire et couleur du ciel

- 1) Expérience de la cuve d'eau avec un peu de lait entier, éclairée par une lampe  $QI$ , les molécules de lait sont polarisables, justifier le régime de Rayleigh.
- 2) Explications de tous les phénomènes observés : couleur rayonnée, couleur transmise, polarisation du faisceau incident, du faisceau émis sur les côtés.

Conclusion : ouverture sur l'application aux télécommunications, éventuellement sur l'impossibilité du modèle « planétaire » de l'atome (les électrons rayonnent).

LP 33 : Présentation de l'optique géométrique à l'aide du principe de Fermat. Exemples.

Bibliographie :

- Bertin, Optique géométrique
- May, Introduction à l'optique
- Becherrawy, Optique géométrique
- Dettwiller, Qu'est-ce que l'optique géométrique

Prérequis :

- Lois de Descartes
- Conditions de validité de l'optique géométrique

Plan :

Intro : les lois de l'optique géométrique étaient connues pour certaines depuis l'Antiquité, nous allons aujourd'hui montrer qu'on peut les retrouver à partir d'un principe introduit par Fermat au XVII<sup>ème</sup> siècle.

I) Cadre de l'optique géométrique et principe de Fermat

- 1) Notion de rayon lumineux.
- 2) Définition du chemin optique.
- 3) Énoncé du principe de Fermat, sous forme variationnelle, exemples du miroir plan (chemin minimal), d'un miroir elliptique (chemin constant), d'un miroir concave (chemin maximal).

II) Lois de l'optique géométrique

- 1) Propagation rectiligne et retour inverse.
- 2) Loi de la réflexion et de la réfraction (Snell-Descartes).
- 3) Notion de stigmatisme (exemple du miroir elliptique).
- 4) Équation des rayons lumineux (ne pas la démontrer).

III) Conséquences et applications.

- 1) Déviation d'un faisceau lumineux en présence d'un gradient d'indice (faire l'exemple de la cuve remplie d'eau très sucrée dans laquelle passe un faisceau laser).
- 2) Explications des phénomènes de mirage.
- 3) Principe de la fibre optique (saut et gradient d'indice).
- 4) Stigmatisme entre le foyer d'une parabole et l'infini (exo Becherrawy).

IV) Vers l'optique ondulatoire

- 1) Définition des surfaces d'onde.
- 2) Démonstration de la loi de Malus.

Conclusion : ouverture sur le traitement ondulatoire de l'optique. (NB : on peut obtenir le principe de Fermat à partir de l'électromagnétisme via l'équation eikonale).

LP 34 : Application des lois de l'optique à l'étude d'un instrument d'optique au choix.

Bibliographie :

- Houard, Optique : une approche expérimentale et pratique
- Dettwiller, Instruments d'optique
- Duffait

Prérequis :

- Lois de l'optique géométrique
- Diffraction

Plan :

Intro : l'œil est le premier « instrument d'optique », néanmoins, sa résolution est limitée à l'angle, et n'est pas très adapté à l'étude d'objets astrophysiques, ou microscopiques, ouverture historique sur la lunette, l'instrument que l'on va étudier aujourd'hui.

#### I) Structure d'une lunette astronomique

- 1) Montage, définition de l'oculaire et de l'objectif, insister sur le fait que c'est un instrument afocal, faire le schéma et la monter en vrai.
- 2) Grossissement ( $G$ ), montrer sur le dispositif expérimental qu'il y a un grossissement et que l'image est inversée, faire le calcul géométrique du grossissement (qui correspond au grandissement angulaire ici). Donner des OdG de lunettes commerciales.

#### II) Luminosité et lunette

- 1) Diaphragme d'ouverture, présentation théorique et expérimentale, définition de la pupille d'entrée et de sortie (qui est le cercle oculaire), calcul de la position et du diamètre du cercle oculaire.
- 2) Grossissement équipupillaire ( $G_e$ ).
- 3) Clarté, définition, séparation en deux cas « image ponctuelle » et « image étendue », calculs dans les deux sous-cas «  $G > G_e$  » et «  $G < G_e$  ».

#### III) Champ

- 1) Diaphragme de champ, présentation théorique et expérimentale, mise en évidence du vignettage.
- 2) Suppression du vignettage, diaphragme de champ dans le plan focal intermédiaire, ou verre de champ.
- 3) Champ image et champ objet (qui est très petit).

#### IV) Résolution

- 1) Diffraction, critère de Rayleigh.
- 2) Limite de résolution due à l'œil, grossissements résolvant et optimal.
- 3) Autres limitations : aberrations, turbulence atmosphérique.

Conclusion : on a vu qu'on pouvait appliquer les lois de l'optique à l'étude d'un instrument construit dans un but précis, il existe évidemment plein d'autres instruments.

LP 35 : Obtention d'interférences à deux ondes en optique. Notion de cohérence.

Bibliographie :

- Cap Prépa PC
- Taillet Optique
- Mauras Optique physique
- Hprépa Optique ondulatoire

Prérequis :

- Ondes électromagnétiques
- Optique géométrique

Plan :

Intro : on a vu l'optique géométrique, qui n'est pas suffisante pour décrire les comportements ondulatoires de la lumière, nous allons, à partir de l'étude des ondes électromagnétiques, mettre en évidence l'un de ces comportements, les interférences (donner l'idée avec la somme de 2 sinus déphasés de  $\pi$ ).

I) Interférence de deux ondes lumineuses

- 1) Modèle ondulatoire de la lumière, commentaire sur les détecteurs optiques, à quoi est-on sensible ?
- 2) Superposition générale de deux ondes, différence de marche (le chemin optique a déjà été vu).
- 3) Conditions d'obtention d'interférence (définition du terme d'interférence) : même polarisation, même fréquence, sources cohérentes, différence de marche inférieure à la longueur de cohérence (l'introduire avec les trains d'onde, faire sentir avec les mains qu'on va avoir une baisse de contraste avec l'augmentation de la différence de marche).

II) Figures d'interférence et dispositifs expérimentaux.

- 1) Calcul de la différence de marche, cas limites de l'écran aligné avec les deux sources (anneaux d'interférence) ou perpendiculaire à leur axe (franges d'interférence).
- 2) Principaux dispositifs expérimentaux (mentionner la division d'amplitude et la division de front d'onde).

III) Retour sur la notion de cohérence.

- 1) Cohérence temporelle : faire sentir avec les mains que la superposition de deux figures dilatées différemment va brouiller les interférences, somme de deux longueurs d'onde, généralisation à une bande de fréquences.
- 2) Cohérence spatiale : faire sentir avec les mains que la superposition de deux figures décalées va brouiller les interférences, calcul pour les fentes d'Young.

Conclusion : ouverture sur les applications de l'optique ondulatoire (permet de mesurer de très petites longueurs de façon très précise), spectroscopie, etc.

## LP 36 : Interféromètres à division d'amplitude. Applications.

### Bibliographie :

- Mauras Optique physique
- Hprépa Optique ondulatoire
- Duffait

### Prérequis :

- Optique ondulatoire, notion d'interférence
- Notion de cohérence

### Plan :

Intro : on a vu les phénomènes d'interférence et les deux types de dispositif, les dispositifs à divisions du front d'onde et les dispositifs à divisions d'amplitude, nous allons voir les limitations des premiers et l'intérêt des seconds.

#### I) Théorème de localisation

- 1) Les dispositifs à division du front d'onde donnent des figures généralement peu lumineuses, mais peut-on augmenter la taille de la source ?
- 2) Calcul de la différence de marche entre deux points d'une source lumineuse (qui sont incohérents entre eux).
- 3) Conditions de non-brouillage : soit la source doit être étendue dans la direction perpendiculaire aux rayons lumineux, soit les rayons doivent tous avoir la même direction, dans ce cas on a un dispositif à division d'amplitude, il en résulte une localisation des interférences.

#### II) Interféromètre de Michelson

- 1) Description du dispositif, intérêt de la compensatrice.
- 2) Étude en lame d'air, localisation des interférences à l'infini, calcul de la différence de marche, anneaux d'égalé inclinaison. → application à la résolution du doublet du sodium.
- 3) Étude en coin d'air, localisation des interférences à proximité des miroirs, calcul de la différence de marche, franges d'interférence → application à la mesure de l'épaisseur d'une lamelle de verre.

#### III) Interféromètre de Fabry-Pérot

- 1) Description du dispositif.
- 2) Calcul de l'intensité comme somme d'ondes déphasées, en fonction de la différence de marche (qui s'exprime de la même façon que pour le Michelson en lame d'air), discussion sur la finesse, sur la séparation des ordres successifs, sensibilité du réglage → applications aux filtres interférentiels.

Conclusion : ouverture sur les applications industrielles de ces dispositifs (mesures de petites longueurs, de défauts de surface, asservissement en position, etc.)

## LP 37 : Diffraction de Fraunhofer – Applications.

### Bibliographie :

- Taillet
- Cap Prépa PC ou Sanz
- Mauras Optique physique

### Prérequis :

- Optique géométrique
- ELM, ondes planes et sphériques

### Plan :

Intro : on a vu l'optique géométrique, mais elle ne permet pas d'expliquer les phénomènes de diffraction, que l'on peut expérimenter couramment (parler des rideaux, de plisser les paupières), faire une petite manipulation pour le montrer.

#### I) Le principe d'Huygens-Fresnel, diffraction de Fresnel et Fraunhofer

- 1) Énoncé du principe d'Huygens-Fresnel (uniquement évoquer le facteur d'inclinaison, qu'on prendra égal à 1 aux petits angles), ne pas expliciter la constante multiplicative (on aura l'amplitude à un facteur près).
- 2) Application à la situation « type » de la diffraction, faire un schéma, poser les coordonnées dans le plan image et dans le plan de l'objet diffractant, définir la transparence, donner des exemples simples (fente, objet de phase).
- 3) Développement du calcul d'Huygens-Fresnel, approximation des petits angles pour obtenir la diffraction de Fresnel (le terme de déphasage dû à la source est constant si on prend une onde plane en incidence normale), approximation supplémentaire pour obtenir la diffraction de Fraunhofer : rigoureusement « source et image à l'infini », de façon approchée « image dans le plan conjugué de la source » (le faire sentir avec le terme source égal à l'onde sphérique convergente à l'image, en profiter pour montrer que la figure de diffraction est centrée sur l'image géométrique de la source).

#### II) Propriétés de la diffraction de Fraunhofer

- 1) C'est une transformée de Fourier, il en découle toutes les propriétés de la TF, faire le calcul pour une ouverture rectangulaire.
- 2) La translation de l'objet diffractant dans son plan ne change rien, application à la diffraction par N objets répartis au hasard (poudre).
- 3) Théorème de Babinet (des images complémentaires).

#### III) Applications

- 1) Limite de résolution des instruments d'optique, critère de Rayleigh.
- 2) Filtrage spatial, détramage (filtre passe-bas), strioscopie (filtre passe-haut).

Conclusion : on a vu les conditions d'applications de la diffraction de Fraunhofer, en pratique on est en Fraunhofer approché dès que la source et l'écran sont assez éloignés, ouverture sur la diffraction par des structures périodiques (application à la matière condensée).

LP 38 : Diffraction par des structures périodiques dans différents domaines de la physique.

Bibliographie :

- Taillet
- Cap Prépa PC
- Ashcroft (cristallographie)
- Cagnac (pour justifier l'utilisation de la diffusion de neutrons en cristallographie)
- Garing, Ondes mécanique et diffusion (échographie)

Prérequis :

- Optique ondulatoire, diffraction, interférences

Plan :

Intro : on a vu les lois de la diffraction pour des objets « simples » (une fente, un trou, etc.), nous allons nous intéresser maintenant à des structures « périodiques » qui vont nous permettre de faire sortir un certain nombre de comportements communs.

I) Premier exemple : le réseau optique

- 1) Cas du réseau infiniment fin, calcul de la différence de marche entre deux fentes successives, calcul de la figure de diffraction.
- 2) Définition de la finesse, calcul de la résolution, application à la spectroscopie (ne pas oublier le rôle de la fente d'entrée).
- 3) Cas d'un réseau avec des fentes de taille finie, décomposition de la figure de diffraction en deux termes « facteur de forme » (le sinus cardinal dû à une fente ici) et « facteur de structure » (celui qu'on a calculé avant), justification par la transformée de Fourier, insister sur la généralité de la décomposition, montrer qu'on a deux échelles de motifs.

II) Utilisation des deux échelles : échographie.

- 1) Présentation rapide de l'échographie.
- 2) Difficulté de faire une onde très directive avec un unique transducteur.
- 3) Utilisation d'un réseau de transducteurs pour atténuer les pics non centraux, amélioration de la directivité, diagramme de rayonnement.
- 4) Ajout d'un déphasage entre les transducteurs, contrôle de la directivité (faire un lien avec le réseau blazé).

III) Étude d'un réseau « naturel » : propriétés d'un cristal (réseau 3D)

- 1) OdG de distances interatomiques dans un cristal, justification de l'utilisation de neutrons thermiques pour la diffraction.
- 2) Condition d'interférences constructives dans la diffraction, loi de Bragg et de Von Laue (définir au passage le réseau réciproque sans s'appesantir).
- 3) Construction d'Ewald, différentes méthodes pour voir un pic de diffraction.
- 4) Retour sur le facteur de forme et le facteur de structure dans le cas des cristaux.

Conclusion : les lois de la diffraction nous ont permis de construire un outil adapté à un usage spécifique, et de prévoir des méthodes pour sonder la composition de la matière à l'échelle atomique.

LP 39 : Absorption, émission spontanée ou induite du rayonnement. Caractéristiques et applications.

Bibliographie :

- Farcy « Physique du laser » (très bien pour la nécessité de l'émission stimulée et le modèle à 2 niveaux)
- Dangoisse
- Taillet (éventuellement)

Prérequis :

- Corps noir
- Notion de photon, niveau d'énergie quantifiés des atomes
- Optique géométrique et ondulatoire
- Facteur de Boltzmann

Plan :

Intro : on a déjà vu, d'une part la quantification du rayonnement avec la loi de Planck et la notion de photon, et l'équilibre entre le rayonnement la matière avec le corps noir, il reste à voir par quels mécanismes la matière et le rayonnement interagissent.

I) Interaction matière rayonnement : coefficients d'Einstein

- 1) Modélisation du milieu matériel : atomes ou molécules avec des niveaux d'énergie quantifiés, pour simplifier on les suppose non dégénérés.
- 2) Deux mécanismes « naturel », l'absorption et l'émission spontanée, coefficients d'Einstein associés (interpréter en termes de temps de relaxation pour l'émission spontanée).
- 3) Nécessité d'un troisième type d'interaction : on ne retrouve pas quelque chose de cohérent avec la densité spectrale d'énergie volumique de la loi de Planck, on doit rajouter l'émission stimulée, relations entre les coefficients (qu'on obtient dans la foulée), OdG entre émission stimulée et spontanée.

II) Application au laser

- 1) Différence entre une lampe spectrale et un laser (temps de cohérence, directivité, puissance, largeur spectrale).
- 2) Le principe : un milieu amplificateur dans lequel on fait de l'émission stimulée, dans une cavité Fabry-Pérot, notion d'inversion de population.
- 3) Impossibilité de l'inversion de population pour un système à 2 niveaux (même avec le pompage), nécessité d'un système à 3 niveaux.
- 4) Discussion sur la largeur spectrale (montrer avec Spid HR et le laser transparent, les longueurs d'onde sur le côté de la cavité et dans le faisceau).

III) Refroidissement des atomes par laser

- 1) Principe, schéma, OdG.

Conclusion : ouverture sur les très nombreuses applications des lasers (chirurgie, télémétrie, lecteurs CD, etc.).

LP 40 : Aspects corpusculaires du rayonnement. Notion de photon.

Bibliographie :

- Aslagnul 1
- Cagnac (moment cinétique principalement)
- Belorizky (très simple)
- Hladik (éventuellement pour l'effet Compton)
- Garing (effet de la pression de radiation avec OdG)
- Dangoisse (ralentissement laser)

Prérequis :

- Corps noir
- Optique géométrique et ondulatoire

Plan :

Intro : la lumière a été décrite successivement par deux théories, l'optique géométrique, puis l'optique ondulatoire, qui permet de retrouver les lois de la première, nous allons voir que la mécanique quantique a réintroduit un comportement corpusculaire pour le rayonnement.

- I) La quantification de l'énergie du rayonnement, particule de lumière
  - 1) Le corps noir, nécessité d'une énergie quantifiée pour retrouver la loi expérimentale (ce n'est alors qu'un artefact de calcul).
  - 2) L'effet photo-électrique, la réalité d'un « quantum de lumière », le photon.
- II) Quantité de mouvement et moment cinétique du photon
  - 1) Application des lois de la relativité restreinte au photon, justification de la masse « nulle », expression de la quantité de mouvement.
  - 2) Mise en évidence expérimentale, pression de radiation.
  - 3) Mise en évidence d'un moment cinétique porté par le rayonnement, interprétation en termes de moment cinétique du photon (mentionner le fait qu'on peut montrer en théorie quantique des champs que le photon a un spin 1).
- III) Applications
  - 1) Effet Compton.
  - 2) Refroidissement des atomes.
  - 3) Photo-récepteurs.

Conclusion : ouverture sur les interactions matière/rayonnement (laser, tout ça), éventuellement sur les sources de photon uniques, la cryptographie quantique, ce genre de choses.

## LP 42 : Exemples de phénomènes quantiques

### Bibliographie :

- Aslangul 1
- Cohen-Tannoudji 1
- Basdevant et Dalibard

### Prérequis :

- Notion de fonction d'onde, équation de Schrödinger, relation d'Heisenberg

### Plan :

Intro : on a déjà évoqué certaines « particularités » de la mécanique quantique, comme la dualité-onde corpuscule, on va s'intéresser aujourd'hui à décrire un certain nombre de phénomènes quantiques en comparant les résultats « classiques » à ceux observés.

#### I) La quantification du rayonnement et l'existence du photon

- 1) Le problème du corps noir, la quantification de l'énergie est introduite de façon « arbitraire », pour permettre de résoudre le problème et de retrouver la loi expérimentale (ne pas passer trop de temps dessus).
- 2) L'effet photo-électrique, l'existence du photon, quantum de lumière, d'énergie et de quantité de mouvement bien définies (ouverture vers la pression de radiation).

#### II) La quantification des énergies atomiques et les ondes de matière

- 1) L'expérience de Franck et Hertz, la preuve de l'existence de niveaux d'énergie quantifiés pour les atomes (ouverture vers le confinement).
- 2) Les interférences de matière, l'abandon de la notion de trajectoire, une première ouverture vers le statut de la mesure par la non neutralité de l'observateur (Cohen-Tannoudji, interférences où l'on cherche à mesurer par quel trou passe la particule, brouillage des interférences via la relation d'Heisenberg).

#### III) Le spin

- 1) L'expérience de Stern et Gerlach, deux niveaux de lecture : l'existence d'une quantification du moment cinétique, l'existence d'un moment cinétique intrinsèque : le spin.
- 2) Le rôle de la mesure, projection du système sur un état propre, expériences de Stern et Gerlach consécutives.

Conclusion : ouverture vers un formalisme général qui va permettre de résoudre les problèmes de mécanique quantique pour avoir un caractère prédictif et non plus descriptif comme ça a été le cas dans cette leçon.

LP 43 : Confinement de l'électron et quantification de l'énergie. Exemples.

Bibliographie :

- Basdevant (bien pour l'atome d'hydrogène et des calculs très rapides pour le puits fini)
- Aslangul 1 (bien pour la discussion physique autour du puits fini)
- Cohen-Tannoudji (pour les calculs plus « rapides » pour le puits fini)
- Basdevant et Dalibard « Problèmes quantiques » (les ions colorés et quantum box)
- Panorama de la Physique (pour la quantum box)

Prérequis :

- Fonction d'onde, équation de Schrödinger, ECO

Plan :

Intro : la mécanique quantique amène à une quantification, qui a lieu en particulier pour les énergies autorisées pour un système, ce qui n'est pas le cas en mécanique classique, nous allons voir comment le confinement amène une telle quantification.

- I) L'impossibilité du modèle classique de l'atome et la modélisation du confinement
  - 1) Utilisation des relations d'Heisenberg pour montrer que le modèle de Bohr ne peut avoir de réalité « physique » (Cohen).
  - 2) Intérêt de l'étude de systèmes confinés (c'est le cas pour les atomes a priori), choix de la modélisation d'un puits de potentiel (Cohen et Basdevant).
  - 3) Continuité de la fonction d'onde et de sa dérivée dans un puits fini (Cohen).
- II) Une particule quantique dans un puits de potentiel fini
  - 1) Position du problème, analogie classique (Aslangul), solutions de l'équation de Schrödinger pour la fonction d'onde dans les différents domaines (Cohen).
  - 2) Conditions aux limites, recherche de solution, équations de quantification du vecteur d'onde, donc de l'énergie. (Cohen et Aslangul)
  - 3) Discussion qualitative de l'évolution des propriétés selon les paramètres du puits comparés à ceux de la particule (Aslangul).
  - 4) Résumé des propriétés générales du confinement : quantification de l'énergie, niveau fondamental supérieur à la valeur du potentiel dans le puits, nombre fini de niveaux pour un puits fini. (Aslangul)
- III) Exemples et applications
  - 1) Ions colorés (Basdevant « Problèmes quantiques »)
  - 2) Atome d'hydrogène, forme du potentiel en fonction de la quantification du moment cinétique, équation radiale uniquement (on a un ECO avec  $L_z$  et  $L^2$  et on a déjà vu leurs fonctions propres), discussion des résultats (Basdevant)
  - 3) Quantum box, expliquer qualitativement (si temps).

Conclusion : ouverture sur un autre phénomène « étrange » dû à la mécanique quantique, le fait de pouvoir « rebondir » sur une barrière de potentiel trop basse ou de pouvoir traverser une barrière trop haute (effet tunnel).

## LP 44 : Effet tunnel. Applications.

### Bibliographie :

- Basdevant et Dalibard
- Cohen-Tannoudji I
- BUP 734 (radioactivité alpha et effet tunnel)
- Levy-Leblond, Balibar, « Rudiments de mécanique quantique » (radioactivité alpha)

### Prérequis :

- Fonction d'onde, équation de Schrödinger
- Radioactivité alpha
- Représentation de Lewis des molécules

### Plan :

Intro : on a déjà étudié la quantification de l'énergie qui résulte du confinement d'un objet quantique dans un puits de potentiel, nous allons maintenant nous intéresser au cas d'une barrière de potentiel, qui va nous permettre de mettre en évidence l'effet tunnel.

#### I) L'effet tunnel

- 1) Description de la situation : particule en incidence sur une barrière de potentiel d'énergie supérieure à l'énergie de la particule, solutions de l'équation de Schrödinger dans les 3 zones d'espace (on a déjà justifié l'existence de tels potentiels et la continuité de la fonction d'onde et de sa dérivée).
- 2) Calcul de la probabilité de transition, analogie avec l'optique et l'ELM (onde évanescente).
- 3) Approximation de la barrière épaisse pour simplifier les calculs.
- 4) Une première application : le microscope à effet tunnel, principe de fonctionnement, deux types de fonctionnement (à courant fixé ou à altitude fixée).

#### II) La molécule d'ammoniac : inversion du parapluie

- 1) Modèle de la molécule d'ammoniac, forme du potentiel ressenti, interprétation en termes de doubles puits avec une barrière centrale de taille finie.
- 2) Recherche de solutions paires et impaires.
- 3) Interprétation en termes de particule fictive qui peut traverser la barrière par effet tunnel, temps d'inversion. OdG.

#### III) La radioactivité alpha

- 1) Modélisation d'un noyau comme somme d'un autre noyau plus un noyau d'hélium (particule alpha).
- 2) Calcul d'une probabilité de transition pour une barrière quelconque, décomposition en somme de barrières carrées, formule intégrale.
- 3) Temps de demi-vie du noyau.

Conclusion : revenir sur le fait que si l'effet tunnel a l'air « choquant » pour de la matière, c'est quelque chose de « normal » pour des ondes, et que cela illustre bien la dualité onde-corpuscule, et permet de rendre compte de plusieurs phénomènes observés.

LP 45 : Noyau : stabilité, énergie. Applications.

Bibliographie :

- Aslagnul 1
- Valentin, Physique subatomique
- Williams, Nuclear and particle physics

Prérequis :

- Mécanique quantique
- Hydrodynamique
- Diffraction
- Radioactivité (terminale)

Plan :

Intro : historique sur les modèles de l'atome en boule chargée (Thomson), ou planétaire (Perrin), et l'étude du noyau une fois que son existence a été démontrée.

- I) L'existence du noyau : expérience de Rutherford
  - 1) Description de l'expérience et résultats : existence d'un noyau atomique.
  - 2) Limites du modèle, discussion rapide sur l'écrantage, existence d'une interaction autre qu'électromagnétique, la force forte, première approximation de la taille du noyau.
- II) Constitution du noyau
  - 1) Existence des neutrons, définition d'isotope, isotone et d'isobare.
  - 2) Détermination de la densité de charge (diffraction des électrons) et de masse (diffraction des neutrons), calcul de la densité nucléaire.
- III) Énergie et stabilité des noyaux
  - 1) Masse et énergie de liaison, vallée de stabilité, tracé de  $B/A$ , OdG des énergies mises en jeu.
  - 2) Modèle de la goutte liquide, description des différents termes.
  - 3) Un terme supplémentaire : énergie d'appariement.
  - 4) Limites du modèle.
- IV) Applications : énergie nucléaire
  - 1) Types de désintégrations nucléaires, description de la désintégration bêta, différence entre A pair et impair.
  - 2) Fission et fusion nucléaire.

Conclusion : ouverture sur d'autres applications (datation au carbone 14, repérage d'événements atmosphériques particuliers, etc.).

LP 46 : Oscillateurs à deux degrés de liberté en mécanique classique : modes propres. Systèmes à deux niveaux d'énergie en physique quantique. Analogies et différences.

Bibliographie :

- BUP 574 (systèmes à deux niveaux) + BUP 867 (pendules couplés)
- Aslangul 2 (molécule  $H_2^+$ )
- Faroux Renault, Mécanique des fluides et ondes mécaniques
- Cohen-Tannoudji I

Prérequis :

- Mécanique du solide
- Mécanique quantique

Plan :

Intro : la description d'un système peut être simplifiée par le choix des bons modes de représentation, c'est-à-dire les modes qui représentent des états physiques du système et qui forment une base des solutions.

I) Systèmes couplés en mécanique classique : pendules pesants couplés

- 1) Description du problème (pendules identiques, couplés, sans frottement), établissement des équations pour chacun des pendules (TMC).
- 2) Recherche de modes propres, diagonalisation de la matrice du problème, calculs des pulsations et états propres.
- 3) Identification des deux modes propres avec différentes conditions initiales : mode symétrique seul excité, mode antisymétrique excité, cas où les deux modes sont excités.
- 4) Interprétation énergétique : les modes propres ont leur énergie conservée (clair avec les équations qu'ils suivent), ce n'est pas le cas des deux pendules, donner l'énergie mécanique totale, donner la forme de l'énergie de chaque pendule dans le cas où les 2 modes ont été excités simultanément (l'énergie se transfère d'un pendule à l'autre).

II) Système à deux niveaux en mécanique quantique : molécule  $H_2^+$

- 1) Position du problème (Hamiltonien, approximation de Born-Oppenheimer), équivalent à une particule dans un double puits de potentiel.
- 2) Recherche d'une solution comme combinaison linéaire des deux états propres « naturels » (qui correspondent aux deux pendules précédents), obtention d'une matrice du système à partir de l'équation de Schrödinger.
- 3) Diagonalisation de la matrice, énergies et états propres.
- 4) Interprétation en termes de probabilité de présence de la particule : fréquence d'intervention.

Conclusion (à développer presque comme une vraie partie) : revenir sur les analogies et les différences, la résolution est semblable (et si le système est préparé dans un état propre, il y reste indéfiniment) mais les grandeurs qui présentent des comportements analogues ne sont pas les mêmes, en particulier pour le système quantique on voit apparaître une énergie plus basse donc stabilisatrice (explique la stabilité des molécules) alors que pour le système mécanique on a toujours conservation de l'énergie.

LP 47 : La molécule : stabilité, énergie. Applications.

Bibliographie :

- Aslagnul 2 (bien pour  $H_2^+$ )
- Tec et Doc CHIMIE PC/PC\*
- Tec et Doc CHIMIE PCSI
- Atkins (éventuellement)

Prérequis :

- Atome d'hydrogène en mécanique quantique
- Théorie de Lewis des molécules
- Atomistique

Plan :

Intro : on a déjà étudié le modèle atomique en mécanique quantique, et les applications en chimie avec la construction des orbitales atomiques, nous allons maintenant nous intéresser aux édifices polyatomiques, les molécules.

I) La « plus simple » des molécules :  $H_2^+$

- 1) Approximation de Born Oppenheimer, justification avec des OdG.
- 2) Hamiltonien, insister sur le fait que la distance inter-atomique n'est qu'un paramètre de la résolution, présentation des résultats de la résolution exacte.
- 3) Résolution approchée, méthode LCAO, définition des intégrales coulombienne, de recouvrement et de résonance, obtention des énergies propres, tracé des orbitales moléculaires liante antiliante, tracé du diagramme d'OM, discussion sur la stabilité.

II) Extension aux autres molécules

- 1) Hypothèse de non interaction des électrons : application à  $H_2$ , et  $He_2$ .
- 2) Molécules homonucléaires, non interaction des OA éloignées en énergie (on se limite en général aux OA de valence), non interaction des OA ne possédant pas les même symétries : exemple de  $O_2$ , explication du paramagnétisme, bien dire qu'on retrouve Lewis et qu'on a de l'information en plus.
- 3) Molécules homonucléaires avec interactions à 4 OAs,  $N_2$  (éventuellement faire la manip avec  $N_2$  et  $O_2$  liquide versés sur l'électroaimant).
- 4) Cas des molécules hétéronucléaires : résolution plus compliquée, mais on conserve un certain nombre de principes (bien insister sur le fait que la déstabilisation est toujours plus grande que la stabilisation).

III) Spectroscopies

- 1) Spectroscopie électronique pour sonder les niveaux énergétiques des molécules.
- 2) Spectroscopie IR pour les vibrations des liaisons (au-delà de Born Oppenheimer).

Conclusion : ouverture sur la méthode de Hückel qui permet de traiter des molécules à plus de 2 atomes.

LP 48 : Cohésion de la matière condensée.

Bibliographie :

- Benayoun, Physique de la matière condensée
- Ashcroft, Matière condensée.
- Aslangul 2 ou Cohen Tannoudji 2 (pour les rappels sur  $H_2^+$ )

Prérequis :

- Électrostatique, dipôle électrique
- Modèle de la molécule, orbitales moléculaires

Plan :

Intro : on va étudier les raisons de la cohésion de la matière dans l'état « condensé » (solide ou liquide) en s'intéressant pour simplifier au cas des solides cristallins. On va mettre en évidence différents phénomènes de cohésion avec des caractéristiques différentes.

#### I) Le cristal moléculaire

- 1) Définition générale de l'énergie de cohésion.
- 2) Interaction de Van der Waals, origine dans l'interaction dipôle spontanée/dipôle spontané, potentiel de Lennard-Jones. OdG des énergies de cohésion.
- 3) Vérification de la validité du modèle : calcul de la distance interatomique d'équilibre pour les gaz rares, éventuellement compressibilité isotherme. Bien dire qu'on pourrait faire des cristaux de  $CH_4$ ,  $I_2$ , etc. pas que les gaz rares.

#### II) Le cristal ionique.

- 1) Cohésion électrostatique, potentiel de paire, calcul de l'énergie de cohésion dans le cas d'un cristal linéaire où les effets de bords sont négligés, constante de Madelung.
- 2) Application : dissolution du chlorure de sodium.

#### III) Les cristaux covalents et métalliques

- 1) Bref rappel sur la liaison covalente, stabilisation pour  $H_2$  (mais pas pour  $He_2$ ), faire sentir qu'on devrait avoir une stabilisation lorsqu'on met plus de deux atomes en interaction si les couches de valences ne sont pas pleines. OdG des liaisons covalentes.
- 2) Transition continue vers la liaison métallique, délocalisation des électrons dans tout le cristal (figures du Ashcroft), calcul de l'ordre de grandeur de l'énergie de cohésion (Ashcroft).

Conclusion : ouverture sur la théorie des bandes qui permettrait de donner une représentation plus complète des phénomènes pour les cristaux covalents (type « tight-binding model ») et pour les métaux (type électron presque libre).

LP 49 : Chaîne unidimensionnelle infinie d'oscillateurs harmoniques. Approximation des milieux continus.

Bibliographie :

- Cap Prépa PC (position du problème, approximation des milieux continus)
- Portelli (position du problème, OdG et lien miro/macro)
- Garing Ondes mécanique et diffusion (pour l'énergie moyenne)
- Ashcroft et/ou Diu phystat (pour discuter l'interprétation énergétique et pour le réseau à motif)

Prérequis :

- Mécanique du point, notion d'onde

Plan :

Intro : on a déjà vu qu'on pouvait faire un développement limité d'un potentiel au voisinage d'une position d'équilibre pour se ramener à un oscillateur harmonique, on va s'intéresser aujourd'hui à la modélisation des propriétés d'un solide en le modélisant par une chaîne d'OH

#### I) Le modèle de la chaîne infinie d'oscillateurs harmoniques

- 1) Les interactions dans un réseau cristallin moléculaire : potentiel de Lennard-Jones, justification de la modélisation par un OH, conditions aux limites périodiques, effets de bord négligeables.
- 2) Équation du mouvement sur une masse de la chaîne.
- 3) Recherche d'une solution harmonique, équation de dispersion, première zone de Brillouin, effet stroboscopique (pourquoi on peut se restreindre à la première zone de Brillouin), vitesse de groupe et de phase.
- 4) Cas d'un réseau à motif, existence de deux « branches » pour la relation de dispersion (branche acoustique et branche optique) et d'une bande de fréquences interdites (ne pas s'appesantir sur les calculs)

#### II) Approximation des milieux continus

- 1) Hypothèse et démarche, validité de l'approximation.
- 2) Équation continue, on reconnaît une équation de d'Alembert, le milieu n'est plus alors dispersif.
- 3) Lien entre la modélisation microscopique et les propriétés macroscopiques, vitesse du son dans un modèle macroscopique, évaluation du module d'Young d'une barre d'aluminium à partir du modèle microscopique.

#### III) Discussion énergétique

- 1) Énergie moyenne d'un atome.
- 2) Interprétation statistique, équipartition de l'énergie, loi de Dulong et Petit, éventuellement modèle d'Einstein et de Debye (en ouverture).

Conclusion : cette modélisation « simple » nous a permis de mettre en évidence un certain nombre de comportements, notamment la propagation d'ondes et la formule de la capacité thermique (à haute T) dans les solides cristallins.

LP 51 : Paramagnétisme, ferromagnétisme : approximation de champ moyen.

Bibliographie :

- Diu, Physique statistique
- Magnétisme I, du Tremolet de la Cheisserie
- BFR Thermodynamique

Prérequis :

- Bases de physique statistique
- Notion de moment magnétique, magnétostatique

Plan :

Introduction sur les différents comportements des métaux face à un aimant, on va s'intéresser aux modèles microscopiques qui permettent d'expliquer les propriétés magnétiques de certains matériaux

### I) Origine du magnétisme des matériaux

- 1) Moment magnétique atomique → faire le calcul du moment magnétique orbital pour le modèle de Bohr, dire qu'il y a également une composante due au moment magnétique de spin. Introduire le facteur de Landé sans entrer dans les détails de mécanique quantique.
- 2) Milieux paramagnétiques, en l'absence d'interaction entre moments magnétiques, décrire le comportement attendu de  $M$  en fonction de  $B$  et  $T$ , donner des ordres de grandeurs de l'aimantation.
- 3) Milieux ferromagnétiques, décrire l'origine de l'interaction entre les spins, introduire le Hamiltonien d'interaction, parler des domaines de Weiss, donner des ordres de grandeur de l'aimantation.

### II) Paramagnétisme de Curie

- 1) Loi de Curie, calculer l'aimantation moyenne à partir des probabilités données par Maxwell-Boltzmann pour le moment à deux niveaux, définir la susceptibilité magnétique.
- 2) Application à la désaimantation adiabatique, montrer que l'entropie ne dépend que de l'aimantation, dont on a montré qu'elle ne dépendait que de  $B/T$ .

### III) Ferromagnétisme

- 1) Mise en évidence expérimentale de la température de Curie.
- 2) Approximation de champ moyen pour résoudre le modèle d'Ising, obtention de l'équation d'autocohérence par analogie avec le paramagnétisme.
- 3) Transition ferro/para, exploitation de la relation d'autocohérence en champ nul, calcul de la température critique, mise en évidence de la bifurcation avec l'énergie libre, calcul itératif de la position stable, position métastable en champ non nul, divergence de la susceptibilité à  $T_c$ .
- 4) Discussion sur la validité du champ moyen (comparaison aux résultats expérimentaux).

Conclusion : ouverture sur la leçon suivante où on utilise les propriétés du ferromagnétisme.

LP 52 : Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques. Applications.

Bibliographie :

- Précis Bréal, PSI, Electrotechnique.
- Magnétisme II, du Tremollet de la Cheisserie
- La physique des objets quotidiens, Ray et Poizat.

Prérequis :

- Electromagnétisme (vide, diélectriques).

Plan :

Introduction sur le fait que les matériaux magnétiques sont connus depuis longtemps, et qu'on va s'intéresser à un type particulier, les matériaux ferromagnétiques, et leurs propriétés macroscopiques.

I) Caractérisation du ferromagnétisme

- 1) Les équations de Maxwell dans un milieu magnétique, définition de  $M$ ,  $H$ , liste des équations de Maxwell, nécessité d'une équation liant  $M$  et  $H$ .
- 2) Tracé de l'aimantation d'un corps ferromagnétique, description du dispositif expérimental, on trace en fait  $H$  en fonction de  $B$ .
- 3) Présentation du cycle d'hystérésis, interpréter l'aimantation de saturation microscopiquement, définir le champ rémanent et l'excitation coercitive, parler de désaimantation et de courbe de première aimantation, bien dire qu'on a deux domaines, un linéaire et un saturé.

II) Milieu magnétique linéaire homogène isotrope

- 1) Rappel de zoologie des milieux magnétiques : diamagnétique, paramagnétique, et ferromagnétique, comparaison des ordres de grandeur de la susceptibilité magnétique pour les trois.
- 2) Réluctance magnétique, analogie avec la loi d'Ohm, intérêt des ferromagnétiques qui canalisent les lignes de champ (éventuellement illustrer le principe avec un entrefer).

III) Applications

- 1) Le transformateur parfait (dans le domaine linéaire), énoncé des hypothèses, mise en équation.
- 2) Vers le transformateur réel, interprétation énergétique de l'aire du cycle d'hystérésis, différence entre matériaux dur et doux.
- 3) Le disque dur (dans le domaine saturé), explication du principe de stockage, de la méthode d'écriture et de lecture d'un bit d'information.
- 4) Le paléomagnétisme.

Conclusion : ouverture sur les nombreuses applications des matériaux ferromagnétiques (par exemple dans les convertisseurs électromécaniques), éventuellement ouvrir sur le fait que c'est un domaine actuel de recherche (verre de spins, etc.).

LP 53 : Mécanismes de la conduction électrique. Loi d'Ohm. Effet Hall. Applications.

Bibliographie :

- BFR Electromagnétisme 1
- Ascroft, matière condensée.
- Atkins, chimie physique.

Prérequis :

- Electrostatique, électrocinétique
- Conductimétrie
- Notion de flux, équation de conservation

Plan :

Introduction : on a déjà étudié des courants électriques en électrocinétique par exemple, on va maintenant s'intéresser aux mécanismes de cette conduction, c'est-à-dire à des modèles microscopiques de matériaux conducteurs.

I) Densité de courants, conducteurs ohmiques.

- 1) Définition de la conduction électrique, existence de différents types de porteurs de charges.
- 2) Densité de courant électrique, bien faire ressortir qu'il s'agit d'un déplacement moyen (à l'équilibre les porteurs de charge ont un mouvement désordonné à grande vitesse mais de moyenne nulle).
- 3) Mobilité, définition du conducteur ohmique, lois d'Ohm locale et globale (ne pas s'appesantir dessus).

II) Modèles microscopiques de la conduction

- 1) Modèle de Drude, hypothèses, résolution en régime permanent, interprétation du terme de collision comme force de frottement visqueux.
- 2) Modèle pour les solutions électrochimiques, bien faire ressortir l'analogie avec le modèle de Drude (cette fois le terme visqueux est la force de Stokes), application à la conductimétrie.

III) Prolongations du modèle de Drude

- 1) Ajout d'un champ magnétique, effet Hall, application à la mesure de champ magnétique.
- 2) Résolution en régime forcé, application à la transparence des métaux (si temps)

IV) Limites du modèle de Drude

- 1) Résultats expérimentaux non prédits ou en contradiction, impossibilité d'expliquer pourquoi certains matériaux sont conducteurs et d'autres non.
- 2) Aperçu de la théorie des bandes, distinction métal, isolant, semi-conducteur.

Conclusion : ouverture sur les nombreuses applications des semi-conducteurs (capteurs optique, de température, utilisation pour les sondes à effet Hall).

LP 54 : Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique.

Bibliographie :

- Cap prépa Sup et PC/PC\* (RLC et corde de Melde)
- H Prépa, Ondes (2 ressorts couplés)
- Cagnac, Physique atomique 1 (vieille édition)

Prérequis :

- Dipôles classiques en électrocinétique
- Phénomènes ondulatoires (corde de Melde et ondes acoustiques)
- Bases d'électromagnétisme

Plan :

Intro : parler des effondrements de ponts qui entrent en résonance avec le pas des troupes militaires qui passent dessus (éventuellement des oscillateurs à Quartz dans les montres, mais s'attendre à des questions).

I) Oscillateur à une dimension, exemple en électrocinétique

- 1) Rappel : circuit RL, oscillateur harmonique, fréquence propre.
- 2) Oscillateur avec perte, en régime forcé : résonance en courant de l'oscillateur RLC, justifier l'usage de la notation complexe pour résoudre le régime forcé tracer le module et la phase de la fonction de transfert.
- 3) Résonance en tension du circuit RLC, noter la fréquence différente, insister sur le rôle du facteur de qualité.
- 4) Résonance en puissance, montrer qu'elle est la même que la résonance en courant, donner la définition de la résonance comme transfert d'énergie maximal de l'excitateur au système, revenir sur le rôle du facteur de qualité dans la finesse de la résonance.

II) Systèmes à plusieurs degrés de liberté

- 1) Analogie électromécanique : un système masse + ressort avec un frottement fluide est régi par les mêmes équations que le circuit RLC étudié tout à l'heure.
- 2) Système de deux ressorts couplés, montrer qu'on a cette fois 2 fréquences de résonance, faire ressortir que l'énergie est maximale à la résonance.
- 3) Système avec une infinité de degrés de liberté, transition vers les cavités résonantes. Faire un lien entre la corde de Melde et les oscillateurs, résoudre l'équation avec un forçage sinusoïdale et une condition aux limite fixe, faire l'analogie avec les ondes acoustiques.

III) Une résonance dans le domaine microscopique : la résonance optique

- 1) Expérience de Wood : description
- 2) Résolution grâce au modèle de l'électron élastiquement lié, on retrouve une résonance, discuter l'ODG du facteur de qualité. Eventuellement interpréter à partir des niveaux d'énergie quantifiés.

Conclusion : ouverture sur les compromis à faire en termes de facteur de qualité.

LP 55 : Exemples d'effets de non-linéarités sur le comportement d'un oscillateur.

Bibliographie :

- Faroux, Renault, Mécanique 1 (couverture verte)
- Dangoisse, Laser
- Krobb, électronique

Prérequis :

- Mécanique du point et du solide
- Milieux diélectriques, modèle de l'électron élastiquement lié
- Montages à AO

Plan :

Intro : le seul « oscillateur » que l'on a complètement étudié est l'oscillateur harmonique, dont l'équation est linéaire, cet oscillateur est très utile car on peut toujours au voisinage d'une position d'équilibre stable développer un potentiel à l'ordre deux (et obtenir un système de type OH), mais on peut également s'intéresser à des systèmes non-linéaires.

I) Le portrait de phase, un outil utile.

- 1) Introduction du portrait de phase sur le pendule aux grands angles. Tracer le potentiel et le portrait de phase, faire remarquer les différents domaines (fronde, oscillateur harmonique, entre deux), faire remarquer la position « stable » autour de laquelle s'enroulent les trajectoires fermées. Bien dire que si on ne connaît la forme du potentiel le portrait de phase nous renseigne dessus.
- 2) Point stable et notion de bifurcation. Un paramètre extérieur peut déplacer la position stable à énergie nulle, donner l'exemple d'un double puits de potentiel (avec un terme quadratique d'amplitude variable), montrer le diagramme de phase du double puits de potentiel en électronique.

II) L'enrichissement spectral, une conséquence des non-linéarités

- 1) Résolution à l'ordre supérieur du pendule simple par méthode perturbative, on voit apparaître un terme en  $3\omega$ , d'où l'enrichissement spectral. Mentionner la perte d'isochronisme et la formule de Borda (ne pas s'attarder).
- 2) Un exemple d'application en optique non-linéaire : modèle de l'électron élastiquement lié avec un potentiel d'ordre 3, polarisation non linéaire.

III) Un exemple plus exotique : l'oscillateur de Van der Pol

- 1) Bien dire que pour l'instant on a uniquement regardé l'effet d'un potentiel anharmonique sur un oscillateur, on va maintenant s'intéresser à un oscillateur dont le fonctionnement repose sur les non-linéarités. Commenter le montage et l'équation qu'on obtient (expliquer le phénomène oscillant).
- 2) Portrait de phase, discuter les différents régimes (quasi-sinusoïdal, non-linéaire), commenter l'enrichissement spectral et l'apparition d'un cycle limite stable.

Conclusion : ouverture sur la richesse des systèmes NL (transition vers le chaos si on veut).

LP 56 : Illustration de l'intérêt de la notion de symétrie dans différents domaines de la physique.

Bibliographie :

- La symétrie, Sivardière.
- Symétrie et brisure de symétrie, collectif, EDP.
- Mauras, Electromagnétisme.
- Guyon, Hydrodynamique.
- Goldstein, Mécanique.

Prérequis :

- Définitions mathématiques des symétries continues et discrètes
- Physique classique : hydrodynamique, magnétostatique, mécanique du solide, transitions de phase, optique anisotrope.

Plan :

Introduction sur le fait que bien que la symétrie soit quelque chose de facilement observable, son utilisation en physique est plus récente.

#### I) Analyse dimensionnelle

- 1) Dimension d'une grandeur, nécessité d'une invariance d'échelle, par changement d'unité, pour une équation.
- 2) Application de l'analyse dimensionnelle à la prédiction de grandeur physiques sans résoudre le problème complètement, exemple du pendule simple.
- 3) Adimensionnalisation des équations, application à la réalisation de maquettes en mécanique des fluides.

#### II) Principe de Curie

- 1) Énoncé, ne pas oublier la réciproque, exemple des cristaux anisotropes.
- 2) Application à la magnétostatique (B vecteur axial), calcul du champ magnétique créé dans un tore.
- 3) Application à l'hydrodynamique (v vecteur polaire), écoulement de Couette plan.

#### III) Brisure de symétrie

- 1) Introduction d'une bifurcation, exemple de la transition ferro/para.
- 2) Principe de Curie généralisé.
- 3) Autres exemples de bifurcation : mécanique (pendule pesant sur un cercle en rotation), hydrodynamique (turbulence dans le sillon d'un écoulement autour d'une sphère).

Conclusion : revenir sur l'omniprésence de la symétrie, sur sa capacité à simplifier les problèmes, mais également de façon théorique pour la prédiction de comportements, éventuellement revenir sur les limites de l'analyse dimensionnelle (on ne peut pas trouver un facteur sans dimension).