

Proposition de plans des leçons de physique

Lydia Chabane

Concours externe spécial de l'agrégation de physique-chimie, option physique – Session 2023

Table des matières

1	Gravitation.	11
	Introduction	11
1	Interaction gravitationnelle	11
1.1	Définition	11
1.2	Force gravitationnelle	11
1.3	Analogie avec l'électrostatique	11
2	Propriétés du champ gravitationnel	12
2.1	Relation entre le champ et le potentiel	12
2.2	Calcul du potentiel et du champ pour une sphère uniforme	12
3	Le poids	12
3.1	Au lycée	12
3.2	Redéfinition à partir du champ gravitationnel	12
3.3	Mesure de g (manip')	12
4	Applications	12
4.1	Vitesse de libération	12
4.2	Effets de marées	12
	Conclusion	12
	Description de l'expérience	13
2	Lois de conservation en dynamique	14
	Introduction	14
1	Lois de conservation en dynamique	14
1.1	Lois d'évolution	15
1.2	Conservation de la quantité de mouvement	15
1.3	Conservation du moment cinétique	15
1.4	Conservation de l'énergie	15
2	Application au mouvement de force centrale	15
3	Conservation et invariance	15
3.1	Invariance par translation spatiale	16
3.2	Invariance par rotation	16
3.3	Invariance par translation temporelle	16
3.4	Théorème de Noether	16
	Conclusion	16
	Description de l'expérience	16
3	Notion de viscosité d'un fluide. Écoulements visqueux	18
	Introduction	18
1	Viscosité	18
1.1	Définition	18
1.2	Interprétation microscopique	18

1.3	Force volumique de viscosité	19
1.4	Équation de Navier Stokes	19
2	Nombre de Reynolds	19
2.1	Définition	19
2.2	Régimes d'écoulement	19
3	Écoulement autour d'un obstacle	19
3.1	Force de traînée	19
3.2	Régime visqueux : équation de Stokes	19
3.3	Application : mesure de η	19
4	Écoulements parallèle	19
	Conclusion	20
	Description de l'expérience	20
4	Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide	21
	Introduction	21
1	Notion d'écoulement parfait	21
1.1	Définition	22
1.2	Couche limite	22
1.3	Équation d'Euler	22
2	Relation de Bernoulli	22
2.1	Écoulement parfait stationnaire incompressible et homogène	22
2.2	Interprétation énergétique	22
3	Application	22
3.1	Tube de Pitot	22
3.2	Effet Venturi	23
	Conclusion	23
	Description de l'expérience	23
5	Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides	25
	Introduction	25
1	Tension de surface	25
1.1	Définition	25
1.2	Origine microscopique	26
1.3	Force capillaire (7min)	26
1.4	Pression et tension de surface	26
1.5	Mesure de γ (17min)	26
2	Contact à 3 phases : mouillage (22min)	26
3	Influence de la gravité	27
3.1	Nombre de Bond (30min)	27
3.2	Ascension dans un tube (34min)	27
	Conclusion	27
	Description de l'expérience	27
6	Premier principe de la thermodynamique	29
	Introduction	29
1	Premier principe de la thermodynamique	29
1.1	Enoncé	29
1.2	Travaux des forces de pression (11min30)	30
1.3	Exemples de bilan d'énergie	30
2	Applications du premier principe (20min)	30
2.1	Définitions préliminaires	30

2.2	Calorimétrie (24min)	30
2.3	Détente de Joule - Gay Lussac (38min)	31
	Conclusion	31
	Description de l'expérience	31
7	Transitions de phase	33
	Introduction	34
1	Changement d'état d'un corps pur	34
1.1	Description qualitative	34
1.2	Approche thermodynamique	35
1.3	Enthalpie de changement d'état	36
1.4	Modèle de Van der Waals	37
2	Introduction aux transitions d'ordre 2	37
2.1	Transition liquide-gaz au point critique	37
2.2	Transition ferromagnétique-paramagnétique	37
	Conclusion	38
	Description de l'expérience	39
8	Phénomènes de transport	41
	Introduction	41
1	Introduction aux processus irréversibles	42
1.1	Position du problème	42
1.2	Équilibre thermodynamique local	42
1.3	Grandeurs transportées	42
2	Diffusion thermique	42
2.1	Modes de transferts thermiques	42
2.2	Bilan d'énergie	43
2.3	Loi de Fourier	43
2.4	Équation de diffusion	43
2.5	Régime stationnaire [facultatif]	43
2.6	Analogie avec la conduction électrique	43
3	Diffusion de particules	43
3.1	Bilan de particules	43
3.2	Loi de Fick	43
3.3	Équation de diffusion	43
3.4	Approche microscopique	43
	Conclusion	44
	Description de l'expérience	44
9	Conversion de puissance électromécanique	45
	Introduction	45
1	Principe de la conversion électromécanique	46
1.1	Bilan de puissance	46
1.2	Réversibilité	46
1.3	Dans un transducteur réel	46
2	Machine à courant continu	47
2.1	Définition	47
2.2	Structure	47
2.3	Champ magnétique	48
2.4	Principe de fonctionnement	48
2.5	Etude expérimentale en fonctionnement moteur	49

2.6	Applications	49
2.7	Avantages et inconvénients	50
3	Machines à courant alternatif (synchrone)	50
3.1	Champ magnétique tournant (triphase)	50
3.2	Fonctionnement en moteur	50
3.3	Fonctionnement en générateur (alternateur)	50
3.4	Fonctionnement en générateur	50
3.5	Avantages et inconvénients	50
3.6	Applications	50
	Conclusion	51
	Description de l'expérience	51
	Glossaire	51
10	Induction électromagnétique	53
	Introduction	53
1	Approche expérimentale	53
1.1	Expérience introductive	53
1.2	Définition	54
1.3	Deux types d'induction	54
1.4	Loi de Faraday	54
1.5	Loi de Lenz	54
2	Théorie de l'induction	54
2.1	Définition formelle de la fem	54
2.2	Induction de Neumann	54
2.3	Induction de Lorentz	55
3	Aspects pratiques	55
4	Induction mutuelle	55
5	Exemple d'application : le transformateur	55
	Conclusion	55
	Description de l'expérience	55
11	Rétroaction et oscillations	57
	Introduction	58
1	Systèmes bouclés linéaires	58
1.1	Schéma fonctionnel général	58
1.2	Améliorations apportées par la rétroaction	59
1.3	Stabilité	60
1.4	Application aux ALIs	60
2	Oscillateurs	60
2.1	Définition	60
3	Oscillateur à boucle de rétroaction	61
3.1	Oscillateur à pont de Wien	61
3.2	Condition d'oscillations	61
	Conclusion	62
	Description de l'expérience	62
12	Traitement d'un signal. Étude spectrale	63
	Introduction	63
1	Étude spectrale d'un signal	64
1.1	Décomposition d'un signal en série de Fourier	64
1.2	Filtrage (linéaire)	64

2	Modulation et démodulation d'amplitude (non linéaire)	64
2.1	Principe de la modulation	64
2.2	Principe de la démodulation	64
3	Conversion analogique-numérique	65
3.1	Échantillonnage	65
3.2	Filtrage numérique	65
4	Avantages	65
	Conclusion	65
	Description de l'expérience	65
13	Ondes progressives, ondes stationnaires	67
	Introduction	67
1	Généralités sur les ondes	67
1.1	Définition	67
1.2	Équation de propagation : établissement pour la corde vibrante	68
1.3	Solutions de l'équation de d'Alembert	68
2	Solutions stationnaires	68
2.1	Définition	68
2.2	Exemple : la corde de Melde	68
3	Solutions progressives	69
3.1	Définition	69
3.2	Solution générale (théorème)	69
3.3	Onde plane progressive harmonique (OPPH)	69
	Conclusion	69
	Description de l'expérience	69
14	Ondes acoustiques	71
	Introduction	71
1	Propagation dans les fluides	71
1.1	Équation fondamentale des ondes sonores	71
1.2	Linéarisation des équations	72
1.3	Équations de propagation	72
1.4	Célérité des ondes sonores	72
2	Ondes acoustiques planes progressives	72
2.1	Couplage entre v et p	73
2.2	Aspects énergétiques	73
2.3	Vecteur densité de flux	73
2.4	Équation énergétique locale	73
3	Réflexion et transmission d'une OPP	73
3.1	Impédance acoustique	73
3.2	Conditions aux limites	73
3.3	Coefficients de transmission et réflexion	73
	Conclusion	73
	Description de l'expérience	73
15	Propagation guidée des ondes	75
	Introduction	75
1	Propagation dans un guide d'onde à section rectangulaire	75
1.1	Position du problème	75
1.2	Le champ électrique	76
2	Étude des modes TE_{n0}	76

2.1	Relation de dispersion	76
2.2	Aspects énergétiques	76
3	Câble coaxial	76
	Conclusion	76
	Description de l'expérience	77
16	Microscopies optiques.	78
	Introduction	78
1	Microscope de base	79
1.1	Schéma optique simplifié	79
1.2	Grossissement	79
1.3	Aberrations liées aux lentilles	80
2	Limite de résolution et microscopie confocale	80
2.1	Ouverture numérique	80
2.2	Limite de résolution	80
2.3	Profondeur de champ	81
2.4	Microscope confocal	81
3	Microscope à contraste de phase	82
3.1	Intérêt	82
	Conclusion	82
	Description de l'expérience	83
17	Interférences à deux ondes en optique	84
	Introduction	84
1	Interférences à deux ondes	84
1.1	Superposition de deux ondes	84
1.2	Conditions d'interférence, notion de cohérence	85
2	Exemple d'interféromètre : les trous d'Young	85
3	Notion de cohérence spatiale	85
	Conclusion	85
	Description de l'expérience	86
18	Interférométrie à division d'amplitude	87
	Introduction	88
1	Intérêt de la division d'amplitude	88
1.1	Retour sur les fentes d'Young	88
1.2	Théorème de localisation	88
2	Interféromètre de Michelson	89
2.1	Présentation du dispositif	89
2.2	Configuration en lame d'air	89
2.3	Présentation	89
2.4	Franges d'interférence	90
2.5	Configuration en coin d'air	90
2.6	Franges d'interférence	90
3	Interféromètre de Fabry-Perrot	90
	Conclusion	90
	Description de l'expérience	91

19	Diffraction de Fraunhofer	93
	Introduction	93
1	Phénomène de diffraction	94
1.1	Définition	94
1.2	Principe d'Huygens-Fresnel	94
2	Diffraction de Fraunhofer	95
2.1	Conditions	95
2.2	Amplitude et intensité diffractée par une pupille plane	95
2.3	Réalisation pratique	95
3	Quelques exemples de pupilles	96
3.1	Diffraction par une fente rectangulaire	96
3.2	Diffraction par un diaphragme circulaire	96
3.3	Propriétés de la diffraction de Fraunhofer	96
4	Application	97
4.1	Pouvoir séparateur	97
4.2	Filtrage spatial	97
	Conclusion	97
	Description de l'expérience	97
20	Diffraction par des structures périodiques	99
	Introduction	99
1	Diffraction par un ensemble de structures	100
1.1	Diffraction par un ensemble de structures	100
1.2	Structures réparties de façon aléatoire	100
1.3	Structures périodiques : le réseau	101
2	Étude spectrale de la source	101
3	Étude de la structure diffractante	101
3.1	Nécessité des rayons X	102
3.2	Loi de Bragg	102
3.3	Condition de Laue [facultatif]	102
3.4	Exploitation	102
	Conclusion	103
	Description de l'expérience	103
21	Absorption et émission de la lumière	104
	Introduction	104
1	Interaction lumière-matière	105
1.1	Approche expérimentale	105
1.2	Modèle d'Einstein	106
1.3	Coefficients d'Einstein	106
1.4	Relation entre les coefficients	107
2	Applications	107
2.1	Application à la chimie	107
2.2	Application au laser	108
2.3	Amplification par émission stimulée	108
2.4	Rôle de la cavité optique	108
	Conclusion	108
	Description de l'expérience	110

22 Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques	112
Introduction	112
1 Aimantation des matériaux ferromagnétiques	113
1.1 Courbe de première aimantation	113
1.2 Interprétation en domaines de Weiss	113
2 Cycle d'hystérésis	113
2.1 Étude expérimentale : transformateur	114
2.2 Aspects énergétiques	114
2.3 Classement des milieux ferromagnétiques	114
Conclusion	114
Description de l'expérience	114
23 Mécanismes de la conduction électrique dans les solides	116
Introduction	116
1 Modèle classique de la conduction électrique dans les métaux	116
1.1 Présentation du modèle de Drude	116
1.2 Origine des collisions	116
1.3 Loi d'Ohm	116
1.4 Limites	116
2 Modèle des électrons libres (approche semi-classique)	117
2.1 Modèle	117
2.2 Avantages et limites	117
3 Théorie des bandes (approche quantique)	117
3.1 Théorie des bandes	117
Conclusion	117
Description de l'expérience	117
24 Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique	119
Introduction	119
Définition	120
1 Oscillations forcées d'un oscillateur linéaire amorti	120
1.1 Exemple en mécanique : l'oscillateur harmonique	120
1.2 Résonance d'élongation	120
1.3 Résonance de vitesse	121
1.4 Équivalent en électrocinétique	121
1.5 Un exemple en chimie : polarité des molécules	122
2 Cavité résonnante	122
2.1 Définition	122
2.2 Exemple en acoustique	122
2.3 Exemple en optique	123
2.4 Analogie avec la corde de Melde	123
Conclusion	123
Description de l'expérience	124
25 Oscillateurs ; portraits de phase et non-linéarités	125
Introduction	125
1 Oscillateurs non-linéaires	125
1.1 Définition oscillateur	125
1.2 Définition système (non) linéaire	125
1.3 Exemple du pendule simple : mise en évidence de la non-linéarité	126
2 Portrait de phase	126

2.1	Définition	126
2.2	Propriétés	126
3	Application à différents oscillateurs	126
3.1	Oscillateur non-amorti	126
3.2	Oscillateur amorti	127
3.3	Oscillateur auto-entretenu	127
	Conclusion	127
	Description de l'expérience	127
26	Cinématique relativiste. Expérience de Michelson et Morley	128
	Introduction	128
1	De Galilée à Einstein	129
1.1	Mécanique classique	129
1.2	Incompatibilité avec l'électromagnétisme	129
1.3	Expérience de Michelson et Morley	130
1.4	Postulat d'Einstein	131
2	Description relativité restreinte	131
2.1	Événement	131
2.2	Transformation de Lorentz spéciale	131
3	Conséquences sur la cinématique	132
3.1	Perte de la simultanéité	132
3.2	Dilatation du temps	132
3.3	Contraction des longueur	132
3.4	Composition des vitesses	132
3.5	Intervalle d'espace-temps	132
	Conclusion	133
27	Effet tunnel : application à la radioactivité alpha	134
	Introduction	134
1	Position du problème	135
1.1	Méthodologie	135
1.2	États liés et états de diffusion	135
1.3	Cas de la barrière de potentiel	135
2	Effet tunnel	135
2.1	Résolution	135
2.2	Coefficients de réflexion et de transmission	136
2.3	Cas de la barrière épaisse	136
3	Application à la radioactivité α	136
3.1	Approche expérimentale	136
3.2	Modèle de Gamow, Gurney et Condon	137
3.3	Probabilité de transmission	137
	Conclusion	137

1

Gravitation.

Niveau : CPGE (2ème année)

Prérequis :

- Mécanique du point
- Électrostatique, théorème de Gauss
- Ellipses.

Bibliographie :

- Mécanique : fondements et applications. Pérez.
- Mécanique, Tome 1. Bertin-Faroux-Renault
- Toute la mécanique, MPSI-PCSI, MP-PC-PSI. Bocquet, Faroux & Renault. Dunod
- Physique PCSI/MPSI, Tout-en-un Dunod, Nouveau programme
- P. Brasselet, Mécanique. PCSI-MPSI.
- Mécanique H-prépa 1ère année MPSI-PCSI-PTSI
- Physique Tout-en-un. Dunod PC-PC*
- Mécanique H-prépa 1ère année MPSI-PCSI-PTSI
- Mécanique 1ère année. Gié & Sarmant. Tec&Doc.
- https://phet.colorado.edu/sims/html/gravity-and-orbits/latest/gravity-and-orbits_fr.html
- <https://www.geogebra.org/m/mmyeu93d>

N.B. : Remarque Karim : vaut mieux bien faire une partie (soit sur l'interaction gravitationnel soit sur un problème à deux corps) en faisant des démonstrations.

Introduction

Slide : les 4 interactions fondamentales. Décrire brièvement chacune d'entre elles.

1 Interaction gravitationnelle

1.1 Définition

1.2 Force gravitationnelle

1.3 Analogie avec l'électrostatique

Analogie et limites

Présenter un tableau de l'analogie et discuter les limites.

[JF]

- Comme la charge est positive ou négative, l'interaction Coulombienne peut être attractive ou répulsive, là où l'interaction gravitationnelle est systématiquement attractive du fait de $m > 0$. D'ailleurs, deux charges de même signe se repoussent !
- Différence importante d'échelle : l'électrostatique régit l'échelle atomique, alors que la gravitation régit le mouvement des corps célestes.
- E dépendant du temps engendre B , mais pas d'équivalent pour le champ de gravitation. D'ailleurs, l'électromagnétisme est à l'électrostatique ce que la relativité générale est à la gravitation : l'élargissement de la théorie aux particules en mouvement.

Champ et potentiel de gravitation

2 Propriétés du champ gravitationnel

[Pérez]

2.1 Relation entre le champ et le potentiel

2.2 Calcul du potentiel et du champ pour une sphère uniforme

Théorème de Gauss. Distinguer cas $r < R$ et $r > R$.

3 Le poids

[Sanz PC, p. 209]

3.1 Au lycée

3.2 Redéfinition à partir du champ gravitationnel

Bien définir R_T et h la hauteur.

Tracer l'évolution de g avec la distance.

3.3 Mesure de g (manip')

4 Applications

4.1 Vitesse de libération

4.2 Effets de marées

Variation du champ de gravitation dû aux autres astres à la surface de la Terre.

Conclusion

La gravitation est à l'origine de

- La pesanteur.
- Le mouvement des planètes.
- Phénomènes de marées.

Description de l'expérience

Expérience

Matériel

- Pendule pesant
- Centrale d'acquisition Sysam-sp5
- Câbles adaptés
- Mètre ruban
- Chronomètre

Protocole

- ▷ Utiliser Latis Pro pour tracer $\theta(t)$. Lisser la courbe. Modéliser par un sinus. Lecture de f .

Aspect quantitatif : Mesure de g .

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}}.$$

2

Lois de conservation en dynamique

Niveau : CPGE

Prérequis :

- Théorèmes généraux de mécanique newtonnienne

Bibliographie :

- Tec&Doc MP. Gié, Sarmant et al. p. 303.
- Toute la mécanique MPSI-PCSI-MP-PC-PSI. Bocquet, Faroux, Renault. J'intègre Dunod.
- Mécanique PC-PSI-MPSI. Pascal Brasselet. puf
- Mécanique : fondements et applications. Pérez
- Dictionnaire de Physique. Taillet.

Notes agrégat

- 2017 : Des exemples concrets d'utilisation des lois de conservation sont attendus.
- 2016 : Lors de l'entretien avec le jury, la discussion peut aborder d'autres domaines que celui de la mécanique classique.
- 2015 : Cette leçon peut être traitée à des niveaux très divers. L'intérêt fondamental des lois de conservation et leur origine doivent être connus et la leçon ne doit pas se limiter à une succession d'applications au cours desquelles les lois de conservation se résument à une propriété anecdotique du problème considéré.

Introduction

[Taillet. p. 149] On dit qu'une grandeur est conservée si elle reste constante au cours d'un processus. Trouver une loi de conservation, c'est trouver une quantité qui ne varie pas au cours du temps. Nous verrons ici les lois de conservations de la mécanique newtonienne.

1 Lois de conservation en dynamique

Cadre de la leçon Dire dès le début que les référentiels considérés lors de la leçon sont supposés galiléen.

[Tec&Doc] En mécanique, on caractérise un système par deux grandeurs vectorielles : sa quantité de mouvement p et son moment cinétique L . Et par une grandeur scalaire : l'énergie. Chacune de ces grandeurs obéit à une loi d'évolution qui* permet de faire le lien entre la variation d'une quantité et les causes de cette variation (principe fondamental de la dynamique, théorème de l'énergie mécanique, théorème du moment cinétique,...).

(*) [JF] <https://www.lpens.ens.psl.eu/wp-content/uploads/2021/04/LeconsPhysique.pdf>.

1.1 Lois d'évolution

$$\begin{array}{ll} \text{PFD} & \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F} \\ \text{TMC} & \frac{d\mathbf{L}}{dt} = \mathbf{M}_O \\ \text{TEM} & \frac{dE}{dt} = \mathcal{P}_{nc} \end{array}$$

Conservation [JF*] Dans les cas particuliers où le terme de cause est nul, on met en évidence une grandeur dont la valeur (norme, direction et sens) est constante dans le temps. On parle alors de loi de conservation.

JF = Jules Fillette.

1.2 Conservation de la quantité de mouvement

[Tec&Doc, Brasselet]

Illustrer avec l'expérience du rebond de la balle [Brasselet, p. 270] ou pendule de Newton [en direct ou https://fr.wikipedia.org/wiki/Pendule_de_Newton#:~:text=5.2%20Liens%20externes-,Description,plan%20m%C3%A9dian%20des%20deux%20barres.] Faire le petit calcul pour l'un ou l'autre.

1.3 Conservation du moment cinétique

[Tec&Doc, Brasselet]

[JF] La remarque fin de page de [Brasselet, p.40] sur l'apport du TMC par rapport au pfd est fort intéressante et peut être discutée ici.

Montrer vidéo tabouret. Faire la danseuse qui déplie et replie les bras [Pérez, p. 324].

1.4 Conservation de l'énergie

[Tec&Doc, Brasselet]

Expérience

[Brasselet, p. 260 et p.270] Chute d'une balle.

Lien avec la thermodynamique

[Tec&Doc]

2 Application au mouvement de force centrale

[BFR, p.134]

3 Conservation et invariance

[Tec&Doc, p. 314. Brasselet, p. 36]

3.1 Invariance par translation spatiale

3.2 Invariance par rotation

3.3 Invariance par translation temporelle

3.4 Théorème de Noether

Conclusion

Conclure sur

- L'intérêt des lois de conservation dans la résolution de problème
- Universalité de p, L, E dans toute la physique [Tec&Doc, p.311]. Donner quelques exemples sur slide.

N.B Savoir comment dériver Noether (<https://nc.agregation-physique.org/index.php/s/ZEnsAc39tMbzh2W?dir=undefined&path=%2FLyon%2FM%C3%A9canique&openfile=48029> ou wik).

N.B Lire sur Runge-Lenz.

Description de l'expérience

TP Outils informatiques [Duffait CAPES. p.241]

Expérience

Matériel

- Balle de ping-pong
- Scotch de couleur
- Grande règle
- Caméra rapide
- Grand écran **qui touche le sol.**

Protocole

- ▷ Brancher la caméra rapide
- ▷ Faire la mise au point sur le logiciel Caméra de Windows 10 : il faut qu'on voit le sol pour voir les rebonds.
- ▷ Démarrer l'acquisition vidéo sur VirtualDub **Attention : lâcher la balle sans vitesse initiale à un point vue par la caméra :**
 - Ouvrir le logiciel, et dans File, cliquer sur Capture AVI
 - Dans la nouvelle fenêtre, aller sur l'onglet Device et vérifier que HD USB Camera est bien sélectionnée.
 - dans l'onglet Video, cliquer sur Capture Pin. On peut alors changer la résolution, qui adapte automatiquement la fréquence d'acquisition. En profiter pour mettre la qualité au maximum.
 - dans l'onglet Capture, aller dans Timing. Vérifier que toutes les cases sont décochées. Cela permet d'assurer la précision du traitement a posteriori.
 - Choisir un nom dans File et Set capture file. Puis lancer l'acquisition dans Capture ou avec F5, pour l'arrêter, appuyer sur Esc.

▷ Traiter la vidéo sur Tracker :

- Ouvrir Tracker, puis ouvrir la vidéo en question. Tracker avertit l'utilisateur si les images n'ont pas des durées identiques sur l'enregistrement (ce qui n'arrive pas avec VirtualDub, mais est fréquent sinon).
 - Délimiter la partie utile : placer sur le curseur sur le début souhaité, puis avec un clic droit définir l'image de départ. De même pour la fin.
 - cliquer sur l'icône Ruban et créer un bâton de calibration. Définir le début et la fin en maintenant la touche Shift, et en cliquant sur les endroits choisis. Modifier la valeur de cette échelle.
 - Créer une nouvelle trajectoire avec l'icône, et choisissez Masse ponctuelle. Se placer sur la première image de la séquence, cliquer sur Masse A, puis Repérage automatique. En maintenant Ctrl et Shift, cliquer sur l'objet à suivre. Puis cliquer sur Chercher. Le logiciel va rechercher cette forme sur toutes les images. Il peut bloquer sur certaines (souvent aux rebonds), dans ce cas déplacer à la main le gabarit sur l'objet, et cliquer sur Chercher ceci, et ainsi de suite.
- ▷ Sélectionner les bonnes variables (y et v_y) et exporter les données vers QtiPlot.
- ▷ Tracer $v_y(t)$, en déduire l'accélération donnée par la pente.
- ▷ Tracer $E_m(t) = E_c(t) + E_p(t)$. Voir les plateaux. **N.B.** Il faut définir E_p avec l'accélération mesurée et non pas g . On trouve $a = 11m/s^2$ et non pas $9.81ms^2...$

Aspect quantitatif : Mesure de E_m . Évaluer le coefficient de restitution (rapport entre l'énergie de l'objet après et avant le choc) en vérifiant qu'il est identique lors de chaque rebond. On peut également vérifier la trajectoire de chute libre entre deux rebonds.

3

Notion de viscosité d'un fluide. Écoulements visqueux

Niveau : 2ème année CPGE

Prérequis :

—

Bibliographie :

- Physique Spé. PC-PC* ou PSI-PSI*. Tec&Doc. Olivier, More, Gié.
- Mécanique des fluides. PC-PSI. H-prépa. Brébec, Desmarais.
- Tout-en-Un Physique PC. Sanz et al.
- Cours Moisy : http://www.fast.u-psud.fr/~moisy/teaching/cours_mecaflu_2017.pdf
- Bonus : Hydrodynamique physique. Étienne Guyon, Jean-Pierre Hulin et Luc Petit. CNRS ÉDITIONS (3ème édition)
- Bonus manip' : <http://materiel-physique.ens-lyon.fr/Logiciels/CD%20N%C2%B0%203%20BUP%20DOC%20V%204.0/Disk%201/TEXTES/1999/08140799.PDF>
- Bonus manip' : <http://materiel-physique.ens-lyon.fr/Logiciels/CD%20N%C2%B0%203%20BUP%20DOC%20V%204.0/Disk%201/TEXTES/1998/08010329.PDF>

Introduction

Manip' qualitative Faire couler différents fluides -> notion de viscosité

1 Viscosité

3'50 : <https://www.youtube.com/watch?v=pqWwHxn6LNo&t=57s>

1.1 Définition

Action de contact exercées par le fluide situé en dessous de z : $dF_t = \eta \frac{\partial v_x}{\partial z} dS u_x$.
Donner l'unité. Donner quelques ordres de grandeurs. Dépend de T, P .

1.2 Interprétation microscopique

Qualitativement.

1.3 Force volumique de viscosité

Hyp. : écoulement incompressible.

1.4 Équation de Navier Stokes

2 Nombre de Reynolds

2.1 Définition

Compétition entre convectif et terme diffusif : $R_e = \frac{vL}{\nu}$. Interprétation.

2.2 Régimes d'écoulement

[H-prépa]

Cas grand R_e vs petit R_e (limite à ~ 2000). Montrer des images écoulement laminaire vs turbulent. Donner quelques valeurs (cours M. Rabaud).

Régime linéaire permanent

Non-linéarité, turbulences et chaos

3 Écoulement autour d'un obstacle

Obstacle = sphère lisse.

3.1 Force de traînée

Force de traînée, coeff de traînée, dépendance en R_e : deux régimes.

3.2 Régime visqueux : équation de Stokes

$$F = 6\pi\eta rv.$$

3.3 Application : mesure de η

Expérience Tracer $v_{lim}(R)$. En déduire η . Au préalable : estimer à la caméra la valeur à quelle distance le régime stationnaire est atteint puis faire les mesures au chrono.

Transition : autre manière de mesurer η

4 Écoulements parallèle

Choisir entre Poiseuille (plan ou cylindrique) et Couette (plan ou circulaire) selon la maîtrise et/ou le temps. Montrer comment on remonte à η .

Rq Pour être cohérent avec la logique, idéalement faire le Viscosimètre de Couette (exo 7 p.153 de H-prépa).

Au pire si vraiment pas la temps, le mettre en sous-section sur slide avec le profil de vitesse et l'équation qui permet de remonter à η expérimentalement.

Conclusion

- Conclure sur couche limite
- Quelques mots sur écoulements turbulents (H-prépa : balle de golf?)
- Autres types de fluides (non-newtonien, rhéofluidifiant, rhéoépaississant).

Description de l'expérience

Expérience

Matériel

- Récipient rempli de silicone
- Chronomètre
- Billes de différents rayons
- Pied à coulisse
- Règle ou mètre
- Balance
- Caméra rapide
- Scotch coloré
- Post-it
- Écran blanc

Protocole

- ▷ Mesurer rayon et masse de la bille.
- ▷ Au préalable : estimer à la caméra la valeur à quelle distance le régime stationnaire est atteint pour la plus grosse bille puis faire les mesures au chrono (enregistrer la chute puis traiter avec Tracker).
- ▷ Calculer le nombre de Reynolds pour chaque bille : attention à la validité du modèle $Re < 1$.
- ▷ Tracer $v_{lim}(R)$. En déduire η . Attention : si la valeur de Reynolds n'est pas valide pour des billes plus grandes et si pas assez de points alors faire une unique mesure. A priori : la plus grosse bille est pour 2mm.

Aspect quantitatif : Mesure de $v_{lim}(R)$. En déduire η .

4

Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide

Niveau : 2ème année CPGE

Prérequis :

—

Bibliographie :

- Physique Spé. PC-PC* ou PSI-PSI*. Tec&Doc. Olivier, More, Gié.
- Mécanique des fluides. PC-PSI. H-prépa. Brébec, Desmarais.
- Tout-en-Un Physique PC. Sanz et al.
- Cours Moisy : http://www.fast.u-psud.fr/~moisy/teaching/cours_mecaflu_2017.pdf
- Bonus : Hydrodynamique physique. Étienne Guyon, Jean-Pierre Hulin et Luc Petit. CNRS ÉDITIONS (3ème édition)
- Bonus manip' : http://www.fast.u-psud.fr/~bertho/TP_L3.pdf
- Bonus manip' : <http://materiel-physique.ens-lyon.fr/Logiciels/CD%20N%C2%B0%203%20BUP%20DOC%20V%204.0/Disk%201/TEXTES/1999/08140799.PDF>
- Bonus manip' : <http://materiel-physique.ens-lyon.fr/Logiciels/CD%20N%C2%B0%203%20BUP%20DOC%20V%204.0/Disk%201/TEXTES/1998/08010329.PDF>

Introduction

[JF] Dans le cas général de l'étude d'un fluide l'équation de Navier-Stokes est une équation compliquée à au moins deux titres : la non linéarité, et la diffusion (laplacien de la vitesse). On étudie ici le cas où la diffusion est négligeable, on constate que cela simplifie grandement l'étude mais on expose aussi une limite du modèle.

[qqun] Dans une leçon précédente, nous avons étudié la dynamique des fluides visqueux, nous avons pu constater que le formalisme était lourd, bien que capable de décrire complètement les phénomènes dans le fluide. Dans cette leçon nous allons, au prix de quelques approximations, alléger l'équation de Navier-Stokes. Ceci est nécessaire, car résoudre les grands systèmes complexes avec l'équation originale est pratiquement impossible du fait de sa non-linéarité. Ceci nous permettra aussi de traiter le cas des écoulements parfaits compressibles.

1 Notion d'écoulement parfait

[Tec&Doc, fin de chapitre viscosité]

1.1 Définition

Définition. Intérêt : simple.

Oui, mais dans la vraie vie n'existe pas.

1.2 Couche limite

A l'exclusion d'une couche limite au voisinage de l'obstacle, le modèle de l'écoulement parfait est valable.

Maintenant qu'on a justifié l'intérêt de ce modèle, on va introduire les équations qui permettent d'étudier cet écoulement.

1.3 Équation d'Euler

Obtention. Propriété.

Cette équation exprime le PFD pour une particule fluide d'un fluide parfait. Cette équation est valide pour un fluide compressible ou non.

Notons que l'équation d'Euler est une équation non-linéaire. Cela signifie que, si l'on connaît une solution u , alors $2u$ ne sera pas solution de cette équation en général. Cet aspect non-linéaire rend la résolution de l'équation difficile, et est une des raisons de la difficulté de la mécanique des fluides.

Éventuellement parler des CLs cinématiques (vitesse) et dynamique (pression).

2 Relation de Bernoulli

[H-prépa, Tec&Doc]

Le théorème de Bernoulli est un résultat très utile aux nombreuses conséquences pratiques, qui traduit la conservation de l'énergie mécanique pour un fluide parfait. Ce théorème découle de l'équation d'Euler, et existe sous deux variantes : stationnaire, ou instationnaire-mais-irrotationnelle.

2.1 Écoulement parfait stationnaire incompressible et homogène

Dérivation le long d'une ligne de courant.

Hypothèse supplémentaire : irrotationnel

Simplification du théorème.

2.2 Interprétation énergétique

Interpréter les différents termes. Possible car pas de dissipation (conservation).

3 Application

3.1 Tube de Pitot

A quoi ça sert ? Monté sur avion, il permet de mesurer la vitesse de l'air « loin de l'avion » par rapport à l'avion.

Modèle

Mise en équation

Expérience

Montrer que la vitesse varie bien en $\sqrt{\Delta P}$.

3.2 Effet Venturi

[Tec&Doc, H-prépa]

Manip' qualitative : souffler sur des feuilles de papier.

Principe

Limites du modèle de l'écoulement parfait

Application

Vidéo de pleins d'expérience : <https://www.youtube.com/watch?v=E32YHDTDy-4>

Trompe à eau, débitmètre de Venturi, portance.

Conclusion

[JF] Le modèle de l'écoulement parfait est un outil efficace pour traiter de l'écoulement des fluides loin des obstacles et pour des écoulements laminaires. En revanche, l'analyse rigoureuse de comportement des fluides au voisinage d'obstacle doit être traitée avec l'outil général de Navier-Stokes, ou a minima en s'intéressant en détail au comportement de la couche limite !

Description de l'expérience

Expérience

Matériel

- Tube de Pitot
- Anémomètre à fil chaud (attention au sens !)
- Soufflerie
- Manomètre différentiel
- Alimentation continue pour manomètre
- Multimètre (voltmètre)
- Fils
- Potence, noix, pinces, truc pour accrocher le manomètre
- Support élévateur
- Thermomètre
- Chronomètre

Protocole

- ▷ Attention : bien faire la conversion pression/tension $\Delta P(V)$ et prendre en compte l'offset.

- ▷ Attention : prendre la température de la pièce.
- ▷ Attention à bien placer l'anémomètre dans le bon sens (flèche dans le sens de l'écoulement) ! Faire une mesure pour vérifier.
- ▷ Mesurer plusieurs points $\Delta P(v)$ et faire une régression linéaire. En déduire ρ

Aspect quantitatif : Mesure de $\Delta P(v) = \frac{\rho v^2}{2}$. Faire une régression linéaire sur $v^2(\Delta P)$ car les incertitudes sont plus grandes sur v . En déduire $\rho_{\text{air}} = 1,204 \text{ kg/m}^3$ à 20°C au niveau de la mer.

5

Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides

Niveau : L3

Prérequis :

- Forces, travaux de force, énergie.
- Principe de travaux virtuels.
- Equation de l'hydrostatique.

Bibliographie :

- Gouttes, bulles, perles et ondes. David Quéré, Françoise Brochard-Wyart et Pierre-Gilles de Gennes. Éditions Belin (2002)
- Hydrodynamique physique. Étienne Guyon, Jean-Pierre Hulin et Luc Petit. CNRS ÉDITIONS (3ème édition)
- Capillarité (cours). P. Lidon. <https://cel.hal.science/cel-01332274>
- Notes de cours sur les fluides (2019-2020). Marc Rabaud. http://ressources.agreg.phys.ens.fr/static/Cours-TD/Rabaud/NotesCours_Agreg2019.pdf
- Why is surface tension a force parallel to the interface? Marchand, A., Weijs, J. H., Snoeijer, J. H., & Andreotti, B. American Journal of Physics (2011)
- TP LLG <http://supernovae.in2p3.fr/~llg/Enseignements/Aggregation/TP/Fluides-Capillarite/fluides-capillarite.pdf>

Introduction (3min)

L'étude des phénomènes interfaciaux permet de répondre à un certain nombre de questions comme : pourquoi est-ce que insectes marchent sur l'eau, pourquoi les gouttes et les bulles ont la formes qu'elles ont, ou encore pourquoi en TP de chimie, lorsqu'on met un liquide dans un tube, on voit la formation d'un ménisque ?

1 Tension de surface

1.1 Définition

Expérience qualitative films de savon sur des surfaces (cubes) : il faut que le système minimise son énergie de surface.

Si on augmente la surface d'une interface dA , le coût en énergie associé vaut :

$$\delta W = \gamma dA \quad (1.1)$$

avec γ le coefficient de tension de surface (J.m^{-2}). C'est l'énergie qu'il faut fournir pour augmenter la surface d'une interface d'une unité. Ex : pour l'interface eau-air, $\gamma = 72.8 \text{ mJ/m}^2$ à 20C.

1.2 Origine microscopique

Une molécule en volume subit des interactions de cohésion de la part de ses voisines qui la stabilisent. Une molécule à l'interface n'a plus de voisines au dessous, cette configuration augmente son énergie. Le fluide ajuste donc sa forme pour exposer le minimum de surface afin de minimiser son énergie.

La forme minimale pour une goutte ou une bulle en l'absence d'interaction est une sphère (vidéo bulle d'eau dans l'espace : https://www.youtube.com/watch?v=bKk_7NIKY3Y).

1.3 Force capillaire (7min)

Le coefficient de tension de surface peut également être vu comme une force par unité de longueur. Vidéo force capillaire https://www.youtube.com/watch?v=g4c_tj1CccE. Permet de répondre à pourquoi le gerris peut marcher sur l'eau : les pattes hydrophobes du gerris déforment la surface de l'eau qui va chercher à retrouver sa forme en appliquant une force capillaire sur les pattes. Comme l'insecte est suffisamment léger, la force arrive à compenser le poids.

1.4 Pression et tension de surface

Question : La pression est-elle plus grande dans les petites bulles ou dans les grandes bulles ?

Expérience avec générateur de bulles : la petite bulle est « mangée » par la grosse.

CCL : la pression est donc plus grande dans les petites bulles : on peut le démontrer mathématiquement via la **Loi de Laplace**. Pour cela, on applique le principe des travaux virtuels. On imagine que l'on déforme une bulle de dR :

$$\delta W = -P_1 dV_1 - P_2 dV_2 + \gamma dA = 0 \text{ à l'équilibre.}$$

$$dV_1 = -dV_2 = 4\pi R^2 dR$$

$$dA = d(4\pi R^2) = 8\pi R dR.$$

Finalement : **Loi de Laplace** :

$$(P_1 - P_2) = \frac{2\gamma}{R} \quad (1.2)$$

- Plus R est petit, plus la pression à l'intérieur est grande.
- Lorsque $R \rightarrow \infty$ (surface plane), on a continuité de la pression.
- Cette loi nous permet de mesurer γ expérimentalement.

1.5 Mesure de γ (17min)

Expérience : Pour une bulle de savon, deux interfaces donc $\Delta P = \frac{4\gamma}{R}$. On génère une bulle, on mesure son rayon et la pression à l'intérieur grâce à un manomètre différentiel de mesurer la différence de pression entre l'intérieur de la bulle et l'extérieur à travers une mesure de tension (piézo). J'ai pris plusieurs points en préparation, je vais en prendre un devant vous. Une regression linéaire $\delta P = \frac{4\gamma}{R}$ permet d'obtenir γ .

19min30

La pente de $\Delta P = 4\gamma \times 1/R$ donne $\gamma = 28.8 \pm 2.2 \text{ mN/m}^2$ qui est plus faible que celle de l'eau dû à la présence d'un tensioactif (savon = tensioactif). Par ailleurs, on retrouve le bon ordre de grandeur pour une eau savonneuse (internet donne 25 mN/m^2).

2 Contact à 3 phases : mouillage (22min)

Mouillage : étude de l'étalement d'une liquide sur un substrat (solide ou liquide). Utile dans l'industrie (peinture, encre, traitement des pneus, crème, maquillage, etc.).

θ = angle de contact, permet de savoir si un liquide mouille plus ou moins bien un substrat. Résulte d'une

compétition entre les tensions de surface intervenant dans les trois interfaces (L/G, L/S, S/G).

26min

Le système est $\{\mathbf{dl} \in \text{ligne triple}\}$. $\mathbf{dF} = 0$ à l'équilibre. La projection sur l'axe du solide donne la **Loi de Young-Dupré** :

$$\gamma_{LG} \cos(\theta) = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} \quad (2.1)$$

3 Influence de la gravité

On voit que plus la taille de la goutte est importante, plus la goutte est aplatie : il y a un effet de gravité qui n'est plus négligeable à partir d'une certaine taille : laquelle ?

3.1 Nombre de Bond (30min)

Compétition entre gravité et tension de surface : $B_0 = \frac{\rho R^2 g}{\gamma}$. La longueur capillaire l_c est telle que : $B_0 = \frac{\rho l_c^2 g}{\gamma} = 1$ (frontière entre les deux régime), soit $l_c = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}}$. Pour l'eau, $l_c = 3\text{mm}$.

Deux régimes :

- $R \gg l_c$, la gravité domine : goutte plate.
- $R \ll l_c$, la tension de surface domine, la bulle est sphérique.

Photo ménisque : résulte de cette compétition entre tension de surface responsable de sa formation et gravité qui s'y oppose. Ménisque concave pour un fluide mouillant (ex : eau dans tube en verre) et convexe pour un fluide peu mouillant (ex : mercure dans tube en verre)

3.2 Ascension dans un tube (34min)

Vidéo de l'ascension d'un liquide dans différents tubes capillaires <http://supernovae.in2p3.fr/~llg/Enseignements/Agregation/TP/Fluides-Capillarite/>. Plus le tube est fin, plus le liquide monte haute. Schéma liquide dans un tube de rayon r , rayon de courbure du ménisque R , angle de contact θ . On applique la loi de Laplace : $\Delta P = \frac{2\gamma}{R} = \frac{2\gamma \cos(\theta)}{r}$. En appliquant l'équation de l'hydrostatique, on obtient la **Loi de Jurin** :

$$h = \frac{2\gamma \cos(\theta)}{\rho g r} \quad (3.1)$$

En effet, plus r est petit, plus h est grand. Cette loi permet de mesurer γ .

Conclusion (40min)

Expérience de conclusion : Pince à nourrice dans eau flotte, puis coule avec tensio-actif (savon).

Description de l'expérience

Expérience

Matériel

- Générateur de bulle
- Pied à coulisse
- Manomètre différentiel + alimentation continue 12V + tuyau
- Eau savonneuse spéciale (glycérol, savon, eau, etc.).
- Multimètre (voltmètre) + câble BNC-double banane
- Chronomètre

Matériel pour manip' qualitatives

- Eau savonneuse spéciale (glycérine, eau, teepol)
- Cadres cubique
- Pince à nourrice
- Verre d'eau
- savon

Protocole

- ▷ Connecter le dispositif au manomètre différentiel (on met l'autre voie du manomètre à la pression atmosphérique)
- ▷ Convertir U en ex : $\Delta P : \Delta P = 125 * (U - 2.27)$.
- ▷ Mesurer la tension en sortie du manomètre et la convertir en ΔP sur Qtiplot
- ▷ Mesurer le diamètre avec un pied à coulisse et le convertir en **rayon** sur Qtiplot
- ▷ Refaire avec des bulles de taille différentes.

Aspect quantitatif : Mesure de la tension superficielle d'une eau savonneuse.

- Tracer ΔP en fonction de $\frac{1}{R}$
- Faire un fit (Loi de Laplace). En déduire γ .

6

Premier principe de la thermodynamique

Niveau : 1ère année CPGE

Prérequis :

- Système thermodynamique fermé
- Transformation thermodynamique quasi-statique
- Fonctions d'état
- Équilibre thermodynamique
- Énergies cinétique et potentielles, travail d'une force

Bibliographie :

- Physique Tout en 1 MPSI PTSI. Bernard Salamito et al. Dunod.
- Thermodynamique 1ère année MPSI-PCSI-PTSI. Jean-Marie Brébec. H Prépa (Hachette Supérieur).
- Bellier 4ème édition : transferts thermiques. p.448
- Manip' : Quanranta. Dictionnaire de physique expérimentale : Tome II - Thermodynamique et applications. p. 43

Introduction (3min)

La thermodynamique classique est une branche de la physique qui s'intéresse aux propriétés macroscopiques d'un système, et qui étudie les transformations de la matière et les échanges d'énergie sous différentes formes entre ce système et son environnement sans chercher à comprendre ce qui se passe au niveau microscopique. C'est une théorie axiomatique basée sur principalement sur deux principes.

Animation : <https://phet.colorado.edu/sims/html/energy-forms-and-changes/latest/energy-forms-and-changes.en.html>. Pour un système isolé, l'énergie ne se crée pas et ne disparaît pas, mais elle se transforme d'une forme à une autre : Ex animation : conversion énergie mécanique-électrique, électrique-thermique.

Si le système est isolé, il y a conservation de l'énergie.

1 Premier principe de la thermodynamique

Système (Σ) fermé.

1.1 Enoncé

Il existe une fonction d'état extensive U appelée énergie interne, telle que :

$$\Delta E = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U = W + Q \quad (1.1)$$

Interprétation :

- $U : \sum_i E_{c,micro} + E_{p,micro}$
- E_c : énergie cinétique macroscopique
- E_p : énergie potentielle macroscopique (ex : $E_p = mgz$)
- W : travail des forces macroscopiques extérieures non conservatives
- Q : transfert thermique (chaleur) dû à l'agitation thermique aléatoire des particules

Q et W deux modes de transferts d'énergie. Ils sont algébriques (comptés positivement si reçus par le système).

Conséquences : Si système isolé : $\Delta E = 0$ (conservation de l'énergie).

Version infinitésimale : $dE_c + dE_p + dU = \delta W + \delta Q$.

1.2 Travaux des forces de pression (11min30)

Schéma fluide contenu dans une paroi. Pression extérieure P_e uniforme et constante. Système = fluide + paroi. Variation du volume total de dV entre t et $t + dt$. En M déplacement de $d\mathbf{M}$.

Force appliquée au système en un point M : $d\mathbf{F} = -P_e d\mathbf{S}$. Travail associé $\delta^2 W = d\mathbf{S} \cdot d\mathbf{M} = -P_e d\mathbf{S} \cdot d\mathbf{M} = -P_e d^2 V$. Travail totale δW s'obtient en sommant les travaux : $\delta^2 W \delta W = -P_e dV$

Si transformation quasi-statique et équilibre mécanique avec l'extérieur $P = P_e$ $\delta W = -pdV$ et $W = -\int_A^B pdV$ entre deux états A et B .

1.3 Exemples de bilan d'énergie

Transformation isochore

$dV = 0$ d'où $W = 0$ donc $\Delta U = Q$.

Transformation monobare et enthalpie

$P_e = cste$ donc $W = -P_e(V_f - V_i)$ donc $\Delta U = Q + W$ donc $Q = \Delta U - W = [U_f + P_f V_f] - [U_i + P_i V_i] = H_f - H_i$.

On définit l'enthalpie $H = U + PV$.

Premier Principe (transformation monobare) : $\Delta H = Q + W_{autre}$.

2 Applications du premier principe (20min)

2.1 Définitions préliminaires

Capacité thermique à volume constant : $C_V = (\frac{\partial U}{\partial T})_V \rightarrow c_V = \frac{C_V}{m}$.

Capacité thermique à pression constante : $C_P = (\frac{\partial H}{\partial T})_V \rightarrow c_P = \frac{C_P}{m}$.

2.2 Calorimétrie (24min)

Expérience Vase Dewar avec agitateur permettant d'homogénéiser le contenu. On peut remonter à la capacité calorifique. La pression extérieure est fixée : transformation monobare. On suppose la transformation adiabatique : $\Delta H = Q = 0$.

Pour le système {eau+calorimètre+fer} : $\Delta H = \Delta H_{eau} + \Delta H_{calo} + \Delta H_{fer} = c_{eau} \times m_{eau} \times \Delta T_{eau} + c_{eau} \times \mu \times \Delta T_{cal} + c_{fer} \times m_{fer} \times \Delta T_{fer}$.

$\mu = 29(3)$ déterminé en préparation. Mesure des masses à la balance : m_{eau} et m_{fer} ; et mesure des températures au thermocouple : $T_{eau+cal}$ et T_{fer} à l'état initial et T_f à l'état final.

On en déduit : $c_{fer} = \frac{c_{eau}(m_{eau} + \mu)(T_{eau+cal} - T_f)}{m_{fer}(T_f - T_i)} = 1016 \pm 184 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à comparer à $c_{fer} = 449 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

2.3 Détente de Joule - Gay Lussac (38min)

Deux enceintes séparées par un robinet. Une enceinte est remplie par un gaz, l'autre par un fluide. Ces enceintes sont calorifugées et avec des parois rigides. On ouvre le robinet.

Système = gaz + vide + enceintes. On a $\Delta U = 0$. Si $U(T)$ (première loi de Joule) : $\Delta U = C_V \Delta T = 0$ donc transformation isotherme.

Cette expérience permet de vérifier si un gaz vérifie la première loi de Joule en mesurant la variation de température.

Conclusion (40min)

Dans cette leçon, on a parlé du premier principe qui est un principe de conservation de conservation. Ce principe est complété par le second principe, qui lui, est plutôt un principe d'évolution et qui porte sur le caractère réversible ou irréversible d'une transformation. Pour finir, ces principes et la thermodynamique classique en général a été formalisée plus tard par la mécanique statistique qui permet d'expliquer les résultats de la thermodynamiques en faisant le lien entre l'échelle microscopique et macroscopique.

Description de l'expérience

[Bellier 4ème édition : transferts thermiques. p.448] ou mieux [Dictionnaire de physique expérimentale : Tome II - Thermodynamique et applications. p. 43]

Expérience

Matériel

- Vase Dewar
- Morceau de fer ou autre
- Thermomètre
- Bouilloire
- Balance
- Chronomètre
- Bonus : Étuve, potence + fil

Protocole **Attention : prendre plutôt le protocole de Quaranta (en bas)**

- ▷ **Prendre μ sur la notice.** SINON : En préparation : déterminer la masse en eau du calorimètre : méthode 1 Bellier : on mesure $T_{cal,i} = T_{amb}$ et on chauffe de l'eau $T_{eau,i}$. On met l'eau dans le calorimètre et on mesure la température d'équilibre T_f . Puis : $m c_{eau}(T_f - T_{eau,i}) + \mu c_{eau}(T_f - T_{cal,i}) = 0$. On en déduit μ .
- ▷ Mesurer m_{fer} et $T_{fer,i} = T_{amb}$. **Mettre le calorimètre sur la balance et tarer.**
- ▷ Mettre de l'eau à chauffer. Mettre l'eau dans le calorimètre et mesurer $T_{eau+cal,i}$.
- ▷ Mettre dans le fer dans le calorimètre + eau. Fermer vite. Agiter.
- ▷ Mesurer la température finale d'équilibre.
- ▷ Faire le calcul pour en déduire c_{fer} .

Alternative [Bellier, Quaranta]

- Mettre le calorimètre sur la balance. Tarer.
- Mettre de l'eau à température ambiante dans le vase. **Mesurer** $T_{i,eau+cal}$ **et mesurer** m_{eau} .
- Mettre rapidement le fer dans de l'eau bouillante/étuve. Laisser thermaliser. Mesurer $T_{fer,i} = T_{eau/etuve}$.
- Puis mettre le fer chaud dans l'eau et suivre la température : elle va monter puis descendre : prendre la température max T_f (cf. courbe p.44 Quaranta). En préparation : Tracer $T(t)$. En leçon, montrer la courbe et prendre deux mesures sur place T_i et T_f .

Aspect quantitatif : Mesure de $c_{fer} = \frac{c_{eau}(m_{eau}+\mu)(T_f-T_{i,eau+cal})}{m_{fer}(T_{fer,i}-T_f)}$.

$$\Delta H = \Delta H_{eau} + \Delta H_{cal} + \Delta H_{fer} = 0 = c_{eau} \times (m_{eau} + \mu) \Delta T_{eau+cal} + c_{fer} \times m_{fer} \times \Delta T_{fer}.$$

7

Transitions de phase

Niveau : L3

Prérequis :

- Potentiels thermodynamiques
- Éléments de thermochimie (variance, potentiel chimique, condition d'équilibre, etc.)
- Variance
- Milieux magnétiques (aimantation, paramagnétisme et ferromagnétisme).

Bibliographie :

- Thermodynamique : fondements et applications. Pérez.
- Thermodynamique. Diu, Guthmann, Lederer, Roulet (DGLR)
- Thermodynamics and an introduction to thermostatistics. Callens. J. Wiley & sons. 1985
- TD Jules Fillette. Énoncé : https://www.lpens.ens.psl.eu/wp-content/uploads/2022/10/TDThermo23_Enonce_TD3.pdf. Corrigé : https://www.lpens.ens.psl.eu/wp-content/uploads/2022/10/TDThermo23_Correction_TD3.pdf
- LP Sylvio Rossetti : https://perso.ens-lyon.fr/sylvio.rossetti/AGREG/LP/LP15_Transition%20de%20phase/Transition_de_phase.pdf
- Cours LKB : <https://www.lkb.upmc.fr/boseeinsteincondensates/wp-content/uploads/sites/10/2017/10/CoursThermo2017.pdf>
- Dictionnaire de physique. Taillet.
- Notice N131 site de Montrouge - Matériel.
- Bonus : cours changement d'état <http://www.phys.ens.fr/~ebrunet/Thermo.pdf>
- Bonus : Physique statistique : Des processus élémentaires aux phénomènes collectifs. Christophe Texier, Guillaume Roux.
- Bonus : Physique statistique et thermodynamique : 2e cycle. Claude Coulon, Stéphanie Moreau.
- Bonus : Physique des transitions de phase – Concepts et applications. Pierre Papon, Jacques Leblond, Paul Meijer
- Bonus : Physique statistique : Cours et exercices corrigés. Livre de Christian Ngô et Hélène Ngô. SCIENCES SUP

Notes agrégat

- 2015 : Il est dommage de réduire cette leçon aux seuls changements d'états solide-liquide-vapeur. La discussion de la transition liquide-vapeur peut être l'occasion de discuter du point critique et de faire des analogies avec la transition ferromagnétique-paramagnétique. La notion d'universalité est rarement connue ou comprise.

- 2014 : Il n'y a pas lieu de limiter cette leçon au cas des changements d'état solide-liquide-vapeur. D'autres transitions de phase peuvent être discutées.

Introduction

Montrer sur slide les phases de l'eau.

[Pérez] Corps pur = système constitué d'une seule espèce. Exemple : eau.

Il peut exister sous plusieurs phase = partie homogène caractérisée par les mêmes propriétés physico-chimiques. Exemple : liquide, solide, gaz.

Le passage d'une phase vers une autre est un changement d'état, ou **transition de phase**.

Définition [Taillet] Transformation macroscopique de la structure d'un milieu sous l'effet d'une instabilité, le faisant passer d'une phase à une autre. Cette transformation est identifiée à l'aide d'une grandeur appelée **paramètre d'ordre**.

On ne vas s'intéresser ici que de corps purs (pas de diagrammes binaires).

On va introduire ce sujet en étudiant une transition de phase qu'on rencontre dans notre vie de tous les jours : les changements d'états.

1 Changement d'état d'un corps pur

[Tec&Doc, Sujet 1993]

On va partir d'un système qu'on connaît bien : l'eau. Il a trois états physique : liquide, vapeur, solide.

1.1 Description qualitative

Diagramme d'équilibre (P,T)

Partir de la variance $v = N + 2 - \varphi = 3 - \varphi$. Pour un corps pur en équilibre sous deux phases, il y a une seule variable d'état intensive indépendante.

Dessiner et décrire le diagramme (faire le cas de l'eau : pente S/L négative (c'est aussi le cas pour le bismuth)). ATTENTION : ce n'est pas le cas en général). Parler du point triple et du point critique.

Application à la métrologie Jusqu'au 20 mai 2019, le kelvin était défini comme la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau (H_2O), une variation de température d'1 K étant équivalente à une variation d'1 °C.

Vidéo point critique <https://www.youtube.com/watch?v=-AXJISFdc2E>

Transition [Diu, p. 300] En regardant juste ce qu'il se passe lorsqu'on augmente la température on aurait envie de dire que l'eau passe subitement du liquide à la vapeur... ce qui n'arrive pas en réalité : les proportions de chaque phase varie continument ! On a besoin du diagramme de Clapeyron (P,V).

Diagramme de Clapeyron (P,V)

[LP Sylvio Rosseti] Dessiner et discuter Diagramme de Clapeyron.

Expérience Isothermes du SF₆. Si vraiment motivé tracer $P(V)$ pour différentes températures en préparation. Sinon montrer la vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=jMfDB0g8ibY>.

Monter le dispositif expérimental (s'il y est). Sinon, montrer le schéma de l'expérience. Prendre la notice N131 sur le site de Montrouge <https://agreg.phys.ens.fr/collection.php?id=946>. Montrer sur slide le schéma des courbes obtenus expérimentalement (N131, dernière page).

- Si la température est suffisamment faible, on observe un palier dans le diagramme de Clapeyron : la transition se fait à pression constante.
- Quand on est sur le pallier on observe 2 phases (une liquide et une gazeuse)
- Si la température est trop élevée on n'observe ni palier, ni interface

La thermo va nous permettre de comprendre ces données empiriques.

1.2 Approche thermodynamique

[Cette partie est fortement inspirée de LKB] La description des transitions de phase peut se faire avec l'approche usuelle de la thermodynamique.

Rappeler ce qu'est un potentiel thermo [Diu, p. 316]

Un potentiel thermodynamique est une fonction d'état particulière qui permet de prédire l'évolution et l'équilibre d'un système thermodynamique, et à partir de laquelle on peut déduire toutes les propriétés (comme les capacités thermiques, le coefficient de dilatation, le coefficient de compressibilité, etc.) du système à l'équilibre. Un potentiel thermodynamique du système thermodynamique décroît lors d'une transformation spontanée et atteint un minimum à l'équilibre.

On doit identifier le potentiel thermodynamique adapté à la situation et on en déduit l'état d'équilibre du système (qu'il corresponde à une phase ou l'autre ou à la coexistence des deux) qui correspond à un minimum de ce potentiel. La particularité de l'étude des transitions de phase est que l'on traite des cas où il peut y avoir plusieurs minima locaux différents du potentiel thermodynamique.

Potentiel thermodynamique et stabilité de l'équilibre

Interprétation de la courbe (P,T) On choisit comme système une petite (mais macroscopique) partie du corps. Ce système a un nombre de particules fixe et sa pression et sa température sont fixées par le système global. La fonction à minimiser est donc son enthalpie libre $G(T, P, N)$. Ici, les variables T, P, N sont les variables externes, fixées dans ce problème ; alors que U et V sont les variables internes qui sont libres de s'ajuster pour aboutir à l'état d'équilibre. En effet, l'énergie et le volume de ce système varient en fonction des échanges avec le reste du système. On a vu que l'énergie va s'ajuster pour donner égalité des températures à l'équilibre. On va raisonner dans cette partie à une température unique et on va étudier la dépendance de l'enthalpie libre en fonction du volume $G(V)$ pour diverses valeurs de la pression.

On trace les profils de l'enthalpie libre pour le cas à deux minima pour différentes valeurs de la pression (T fixée) de part et d'autre d'une transition (utiliser le diagramme P,T).

Lors d'une transition de phase, l'allure typique de la fonction $G(V)$ est représentée sur la figure 8.1 [LKB]. Elle se présente sous la forme d'une fonction à deux minima dont le détail de l'allure varie avec la pression. Chaque minimum correspond à une phase différente ; une de faible volume et une autre de grand volume. Ces deux minima sont séparés par un maximum intermédiaire. On a donc une situation où la dérivée de l'enthalpie libre s'annule en trois points. Le maximum correspond à un état dit instable. Les deux minima sont des états d'équilibre stables mais seul le minimum absolu est l'état d'équilibre du système. L'autre minimum est associé à un état dit métastable. Cela signifie que le système est stable autour de ce minimum mais que si les fluctuations thermiques sont suffisamment importantes, elles peuvent faire passer le système dans l'état d'équilibre.

Exemple : surfusion de l'eau. Vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=8ExRopuown0>.

Coexistence de phases

[LKB] Un dernier cas possible est que les deux minima aient la même valeur. Dans ce cas, quel est l'état d'équilibre ? Il s'avère que cette situation correspond à la coexistence entre deux phases, la phase liquide et la phase vapeur par exemple.

Ceci arrive, à température fixée, pour une pression particulière. Dans le cas de l'équilibre liquide-vapeur, c'est ce que l'on appelle la pression de vapeur saturante. Le même raisonnement à pression fixée donnerait une température particulière $T(P)$ pour la condition de coexistence. On constate donc que les variables P et T ne sont plus indépendantes.

[Pérez] Sur une courbe (P,T) , on a coexistence de deux phases : les potentiels chimiques du corps pur dans les deux phases sont égaux. En plus, la condition d'équilibre est indépendante de x : 2 phases coexistent en proportion arbitraire. On dit que l'équilibre est indifférent. La fraction x peut prendre n'importe quelle valeur fixée par l'extérieur. Ce résultat peut paraître surprenant ; quelle que soit la quantité dans chaque phase, il peut y avoir équilibre.

Point triple Nous avons traité jusqu'ici l'équilibre de deux phases. Il est possible que trois phases soient en équilibre. De la même façon que pour l'équilibre à deux phases on en conclut que les trois phases doivent avoir le même potentiel chimique. L'égalité (8.1) devient donc un couple d'égalité et on en déduit donc que cet équilibre arrive pour un seul couple pression/température. On appelle cette valeur point triple d'un corps. Par exemple, le point triple de l'eau est à une température de 273.16 K et à une pression de 611 Pa. Il a une importance en métrologie des températures puisque la température est fixée indépendamment de la pression ce qui rend sa mesure plus robuste. Le degré (Celsius ou Kelvin) est défini à partir du point triple de l'eau.

Transition On vient de voir la continuité de G . Mais ce n'est pas le cas de toutes les grandeurs thermodynamiques.

1.3 Enthalpie de changement d'état

Exemple transition solide/liquide. On trace $T(t)$: elle est constante pendant le changement d'état. Durant toute cette durée, on apporte de l'énergie quantifiée par une enthalpie de changement d'état.

Définition

C'est l'énergie qu'il faut fournir par passer de façon réversible d'une phase à l'autre à la pression de coexistence de phase P :

$$L_{AB} = T(S^A - S^B) \quad (1.1)$$

N.B. $L_{AB} > 0$ car par convention on choisit toujours pour B la phase haute température qui est donc d'entropie la plus grande. On s'intéresse soit à l'enthalpie molaire ou massique. Unité : soit J/kg ou J/mol. Ordre de grandeur : La chaleur latente de fusion de l'eau à pression atmosphérique est d'environ 330 kJ/kg et la chaleur latente de vaporisation est d'environ 2 200 kJ/kg.

$\delta Q = dm \times L$, dm masse du corps changeant, L enthalpie de changement d'état. Pour une transfo réversible isobare $dH = \delta Q_p = dm \times L$.

Expérience

Mesure de L_v^{eau} dans le cas du changement d'état liquide-vapeur.

Relation de Clapeyron

Si le temps, la démontrer en partant de $\mu_A(P,T) = \mu_B(P,T)$ et de la relation de Gibbs-Duhem . Sinon on la balance.

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L_{AB}}{V_m^B - V_m^A} \quad (1.2)$$

V_m volumique molaire selon ce qu'on prend pour L . Attention à ces histoire de massique/molaire !

Interprétation du diagramme (P,T) $L_v = T(\bar{m}^v - \bar{v}^l) \frac{dP}{dT} |_{L-V}$. Avec \bar{v} volume massique. Pente négative implique dans le cas solide-liquide $v_l < v_s$ donc la glace est moins dense que l'eau : elle flotte.

[Callens] Discuter les conséquences de l'étude de la pente.

Une enthalpie de changement d'état non nulle traduit la discontinuité du volume molaire et de l'entropie molaire lors d'une transition du premier ordre.

Transition On s'est jusque là intéressé à une interprétation basée sur le potentiel thermodynamique. On peut faire une interprétation en termes des isothermes (diagramme (P,V)).

1.4 Modèle de Van der Waals

Traiter cette partie semble illusoire.

Équation d'état

[GDGLR, p.330 + TD JF + Callens p. 234]

Forme intensive.

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2} \quad (1.3)$$

On trace (P,v) pour différentes températures.

Stabilité : $\frac{\partial P}{\partial v} < 0$. Condition violée sur certains intervalles \rightarrow nécessite d'une transition de phase.

Construction de Maxwell

[Diu, p. 330 + TD]

On peut aussi tracer l'allure de $G(P)$ (ou $\mu(P)$).

Suivre le TD pour l'égalité des aires.

Transition On vient de voir un type de transition de phase caractérisée par une coexistence de phase et par l'existence d'une enthalpie de changement d'état. Ce types de transitions sont dites d'ordre 1. Est-ce qu'il y a d'autres types ? Oui : on va étudier un exemple.

2 Introduction aux transitions d'ordre 2

2.1 Transition liquide-gaz au point critique

C'est un point particulier au-delà duquel on ne peut plus faire la différence entre liquide et vapeur. Ceci est lié au fait qu'il n'y a plus de discontinuité du volume.

[Pérez] Utiliser Clapyeron : $L = 0$.

[LKB] On peut comprendre ce point facilement grâce à la figure 8.3. La courbe donnant l'enthalpie libre, qui présente deux minima, se modifie lorsque l'on augmente la température de telle sorte que les deux minima se rapprochent et fusionnent au point critique, donnant alors une seule phase d'équilibre, appelée phase fluide. En ce point, le volume, la température et la pression sont fixés. Pour l'eau le point critique est à environ 374°C et 220 bars et donc peu facile à observer. Mais il est aisément observable pour, par exemple, l'hexafluorure de soufre et donne lieu au phénomène surprenant d'opalescence critique.

2.2 Transition ferromagnétique-paramagnétique

Vidéo introductive : <https://www.youtube.com/watch?v=03XDF5kzrEs>

Observation A champ nul, un milieu ferromagnétique possède une aimantation non nulle pour $T < T_C$ et nulle (en fait, proportionnelle au champ) pour $T > T_c$. L'idée de cette partie est de l'expliquer thermodynamiquement.

Modèle de Landau

[Bobroff]

Landau propose alors de développer le potentiel thermodynamique approprié en puissance du paramètre d'ordre près de TC ce qui permet alors de déduire les différentes réponses quand on s'approche de T_c . C'est légitime car ce paramètre d'ordre s'annule à TC. Ce développement permet alors de calculer les comportements analytiques des fonctions de réponse près de T_c . Prenons l'exemple de la transition vers un état ferromagnétique. On note M l'aimantation du corps qui apparaît sous T_c , paramètre d'ordre de la transition. On développe alors le potentiel de Gibbs G selon les puissances de M . De plus, à l'équilibre, toutes les directions de l'aimantation sont possibles donc G est le même pour M et $-M$, donc une fonction paire de M , d'où on écrit

$$G(M) = G_0 + a(T)M^2 + b(T)M^4 \quad (2.1)$$

Donner les conditions de stabilité sur les signe de a et de b (cf. TD). On dérive pour voir les minima.

N.B. Selon le temps, on peut donner directement $a(T) = A \times (T - T_c)$ et $b(T) = \frac{B}{4}$ avec $A > 0$ et $B > 0$.

Interprétation graphique

[Bobroff et Sylvio]

On trace $M(T)$: On constate que l'aimantation est continue à la transition.

On trace $G(M)$ pour plusieurs températures. On passe de deux minima à un seul. Faire le lien avec le point critique.

Lire sur les limites de Landau [Bobroff].

Conclusion

Classification Plusieurs classifications ont été proposées [ne pas rentrer dans les détails]

- Ehrenfest : L'ordre d'une transition de phase est défini comme suit : c'est l'ordre le plus bas de la dérivée du potentiel thermodynamique G présentant une discontinuité lors d'une transition. A été abandonnée car ne permet pas de rendre compte des transitions pour laquelle la singularité du potentiel thermodynamique est plus complexe qu'une discontinuité de dérivée.
- Landau : basée sur la brisure de symétrie. On passe d'une phase symétrique (ex : para) à une phase pas ou moins symétrique (ex : ferro). Landau utilise alors la notion de paramètre d'ordre, grandeur nulle dans la phase la plus symétrique, et différente de 0 sinon.

Ici, on va présenter la **classification moderne**. On distingue deux classes de transitions de phase : [Faire petits schéma paramètre d'ordre vs paramètre pour chacune des deux classes de transitions \(discontinuité vs pas de discontinuité\)](#).

	Premier ordre	Second ordre
Caractéristiques	Ne possède pas de paramètre d'ordre ou qui possède un paramètre d'ordre discontinu à la transition de phase. Ces transitions s'accompagnent d'une énergie latente de transition et permettent la coexistence des phases. C'est le cas des changements d'état.	Toutes les autres transitions sont du second ordre, elles possèdent un paramètre d'ordre continu à la transition de phase. Elles ne font pas intervenir d'énergie latente de transition et ne permettent pas la coexistence des phase.
Exemples	Dans la transition eau-vapeur, en faisant varier la température en dessous ou au-dessus de la température critique, le système se trouve dans deux états différents (gaz et liquide). Le paramètre d'ordre est la densité ($\rho_{\text{liq}}^{100C} = 0.958 \text{ kg m}^{-3} > \rho_{\text{vap}}^{100C} = 0.597 \text{ kg m}^{-3}$).	ferromagnétique/paramagnétique (aimantation). La transition conducteur/-supraconducteur (Amplitude de la paire d'électrons). Normal-superfluide (amplitude quantique de la fonction d'onde). Transitions allotropiques entre deux types de cristaux d'un solide (graphite-diamant).

Conclure sur d'autres exemples de transitions de phase [Slide] (et nematique-smectique dans les cristaux liquides ?)

N.B. Lors d'une transition de phase du deuxième ordre, au voisinage du point critique, les systèmes physiques ont des comportements universels en lois de puissances caractérisés par des exposants, dits critiques.

[Wiki] It is a remarkable fact that phase transitions arising in different systems often possess the same set of critical exponents. This phenomenon is known as universality. For example, the critical exponents at the liquid-gas critical point have been found to be independent of the chemical composition of the fluid. Universality is a prediction of the renormalization group theory of phase transitions, which states that the thermodynamic properties of a system near a phase transition depend only on a small number of features, such as dimensionality and symmetry, and are insensitive to the underlying microscopic properties of the system.

Lire Sylvio pour les questions.

Description de l'expérience

[TP Transitions de phase]

Expérience

Matériel

- Eventuellement : Appareil Isothermes du SF6
- Vase Dewar, eau
- Balance de précision, niveau à bulle
- Résistance (thermoplongeur)
- Voltmètre
- Ampèremètre
- Pince, potence (x2)
- Alternostat 0-240V
- Chronomètre
- Thermomètre

Protocole

- Brancher avec des fils la prise du thermoplongeur vers l'alternostat.

- Mettre l'ampèremètre en série et le voltmètre en parallèle.
- Tracer $-m(t)$.

Mesure $UI = -\frac{dm}{dt}L_v$. Hyp : $\frac{dm}{dt} \big|_{\text{sans chauffage}} = 0$.
Ajustement linéaire : L_v relié à la pente.

8

Phénomènes de transport

Niveau : PC

Prérequis :

- Thermodynamique à l'équilibre
- Notion de flux
- Conduction électrique

Bibliographie :

- Thermodynamique. DGLR. Hellman
- J.P. Pérez et A.M. Romulus, Thermodynamique. Fondements et applications, Masson, Paris, 1993, page 52.
- Tout en un PC, Sanz et al. DUNOD
- Tec&Doc Physique MP. Gié et al.
- Tec&Doc Physique PC. Gié et al.
- Physique PC. Pascal Olive.

Notes agrégat

- 2017 : La leçon ne peut se limiter à la présentation d'un unique phénomène de transport.
- 2016 : Les analogies et différences entre les phénomènes de transport doivent être soulignées tout en évitant de dresser un simple catalogue.
- 2015 : Les liens et les limites des analogies entre divers domaines doivent être connus.
- 2013 : [À propos du nouveau titre] Le candidat développera sa leçon à partir d'un exemple de son choix.

Introduction

[JF] On a précédemment étudié la thermodynamique des transformation entre état d'équilibre sans jamais se poser la question du chemin suivi (c'était d'ailleurs le grand intérêt des fonctions d'état !). Dans cette leçon, on va lever l'hypothèse d'équilibre thermodynamique et s'intéresser aux mécanismes de transport des grandeurs usuelles (matière, énergie, charge, etc.).

N.B L'entité transférée est transportée par les porteurs de charge. Selon la nature de ces porteurs et les conditions dans lesquelles s'effectue le transfert, on peut distinguer la diffusion (transfert par diffusion), la convection (transfert par convection) et le rayonnement (transfert par rayonnement).

1 Introduction aux processus irréversibles

1.1 Position du problème

[DGLR] Slide : deux corps à des T différentes. La thermo nous donne des infos sur les états d'équilibre initiaux et finaux, sens de l'échange, mais rien entre les deux.

[DGLR] Définition d'un phénomène de transport (slide) : Un phénomène de transfert (ou phénomène de transport) est un phénomène irréversible durant lequel une grandeur physique est transportée d'un endroit vers un autre sans être créée ni perdue en chemin.

Les entités transférées les plus connues sont l'énergie (transfert thermique), la matière (transfert de masse) et la quantité de mouvement (transfert de quantité de mouvement).

Problématique la thermodynamique n'est pas en mesure d'analyser le transport de ces grandeurs (phénomène hors équilibre). Pire, les grandeurs ne sont pas définies hors équilibre. Comment allons-nous nous en sortir ? C'est ce qu'on va voir dans la suite.

1.2 Équilibre thermodynamique local

[JF] Définir les trois échelles et comment arriver à l'équilibre local par découpage en sous volumes mésoscopiques. Donner des exemples d'échelles. Limite de l'hypothèse : déséquilibre pas trop fort ne permettant plus l'approximation linéaire.

[Tec&Doc, p. 660] Définition échelle mésoscopique, ODG, équilibre local.

N.B. Pour les questions [DGLR, p. 463] deux échelles de temps : relaxation et évolution. Eq. local si $\tau_{rel} \ll \tau_{ev}$.

[DGLR, p. 465] Autre condition nécessaire à notre étude est l'approximation linéaire (proche équilibre).

1.3 Grandeurs transportées

- la viscosité (transport de quantité de mouvement) : transfert de quantité de mouvement dû à une inhomogénéité de vitesse ;
- la diffusion moléculaire (transport de particules) : transfert du nombre de particule ou transfert de masse dû à une inhomogénéité de densité particulaire ;
- la diffusion thermique (transport de matière) : transfert thermique (ou chaleur) si la température n'est pas uniforme ;
- la conductivité électrique (transport de charges) : transfert de la charge électrique en cas de différence de potentiel.

[JF] Nous avons établi les conditions générales de l'étude des phénomènes de transport. Nous pouvons donc entamer l'étude successive de deux grands types de transport au programme de PC : le transport de matière et le transport d'énergie sous forme de transfert thermique.

2 Diffusion thermique

[Tec&Doc, Sanz]

La diffusion est le 3ème mode de transfert thermique à côté de la convection et du rayonnement.

2.1 Modes de transferts thermiques

Définir rapidement chaque mode + images/vidéos. Ici, on va s'intéresser à uniquement à la diffusion.

Convection <https://www.youtube.com/watch?v=v62ilJCaMfK>

Diffusion <https://www.youtube.com/watch?v=6byqNP3Tif0>

2.2 Bilan d'énergie

Vecteur densité de flux thermique (déf. et unité). Premier principe.

2.3 Loi de Fourier

Hypothèses. Loi. Sens physique. Limitations. Conductivité thermique. Interprétation microscopique de la loi de Fourier.

Revenir sur la vidéo.

Expérience

Mesure de la conductivité thermique du cuivre. Hypothèses (pas de pertes, RP atteint, etc.). Faire les calculs avec l'équation locale + Fourier.

2.4 Équation de diffusion

Établir. Dire que cette équation est générale à tous les phénomènes diffusifs. Commentaires physiques [DGLR, p. 479].

Interprétation microscopique

Agitation thermique <https://www.youtube.com/watch?v=qW59Y91Jso8>

2.5 Régime stationnaire [facultatif]

A faire ou pas selon le temps. Résistance thermique. Application : double vitrage.

2.6 Analogie avec la conduction électrique

Mettre le tableau de Tec&Doc sur slide. Voir aussi [Olive, p. 588].

3 Diffusion de particules

[Sanz]

Intro : <https://www.youtube.com/watch?v=Mqi4KgR6PzE>

3.1 Bilan de particules

3.2 Loi de Fick

Loi. Signification physique. Coefficient de diffusion, unité et ordres de grandeurs. Limites de validité.

3.3 Équation de diffusion

Commentaires physiques [DGLR, p. 492].

3.4 Approche microscopique

Marche aléatoire 1d. Interprétation microscopique de la loi de Fick [Olive, p. 561].

Conclusion

On a vu plusieurs exemple mais c'est le même phénomène. Même équation $\frac{\partial f(M,t)}{\partial t} = D\Delta f(M,t)$.
 D en $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$. Irréversibilité.

Le moteur microscopique commun à tous les phénomènes de diffusion est l'agitation aléatoire : à une température fixée, chaque molécule possède une énergie cinétique et peut subir des chocs avec les molécules voisines. Plus l'agitation aléatoire est importante, plus les chocs sont nombreux et les transports diffusifs efficaces (diffusion de particules, de la chaleur, de la quantité de mouvement).

N.B. [Wiki] In physics, transport phenomena are all irreversible processes of statistical nature stemming from the random continuous motion of molecules, mostly observed in fluids. Diffusion is a stochastic process due to the inherent randomness of the diffusing entity and can be used to model many real-life stochastic scenarios. There are two ways to introduce the notion of diffusion : either a phenomenological approach starting with Fick's laws of diffusion and their mathematical consequences, or a physical and atomistic one, by considering the random walk of the diffusing particles.

Ouvrir sur la théorie d'Onsager [DGLR, p.508].

[JF] Possibilité d'ouvrir sur l'effet Seebeck qui fait le lien entre différents modes de transport dans les métaux, ou la loi de Wiedmann-Franz. On peut aussi ouvrir sur le transport de quantité de mouvement et le nombre de Reynolds qui permet de quantifier l'importance relative de la convection et de la diffusion.

Description de l'expérience

TP Thermométrie.

Expérience

Matériel

- 2 thermocouples + 2 boîtiers thermocouple de type K + 1 lecteur de thermocouple (+ les câbles thermocouples)
- Alimentation continue
- Montage contenant un barreau de cuivre chauffée à une extrémité par une résistance
- 2 tuyaux pour l'eau (pour refroidir l'autre extrémité)
- Multimètre (ohmmètre puis voltmètre)
- Fils
- Chronomètre

Protocole

- ▷ On mesure au préalable la résistance
- ▷ On fait les branchements et on attend l'établissement du régime permanent.
- ▷ On mesure le gradient de température $A = \frac{T(L)-T(0)}{L}$.
- ▷ On suppose que la puissance électrique fournie $P_e = \frac{U^2}{R}$ contribue entièrement au flux thermique à travers le barreau.
- ▷ $j = \lambda \times A = \frac{P_e}{SA}$. D'où $\lambda = \frac{P_e}{SA}$.
- ▷ Comparer à la valeur tabulée $\lambda = 401 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Aspect quantitatif : Mesure de la conductivité thermique du cuivre.

9

Conversion de puissance électromécanique

Niveau : PSI

Prérequis :

- Force de Laplace
- Induction, champ électromoteur
- Electrocinétique de base
- Mécanique de base

Bibliographie :

- Physique PSI-PSI* Tout-en-un. Dunod.
- Électronique II. H-Prépa 2ème année PSI-PSI*.
- Physique SPÉ PSI*-PSI. Tec&Doc. Olivier, More & Gié.
- Électronique – Conversion de Puissance. PSI-PSI*. ellipses. Taupe-niveau. Meiler, Irlinger & Kempf.
- <https://www.electronique-mixte.fr/wp-content/uploads/2018/07/Formation-Machines-Electriques-cou.pdf>
- Cours JérémY : <https://jeremy.neveu.pages.in2p3.fr/Moteurs/induction.html>
- Animations : <https://sitelec.org/animations2.htm>

Notes agrégat

- 2017 : Une approche à l'aide des seules forces de Laplace est insuffisante. Les candidats doivent aussi s'interroger sur l'intérêt d'utiliser des matériaux ferromagnétiques dans les machines électriques.
- 2016 : Afin de pouvoir aborder des machines électriques de forte puissance, le rôle essentiel du fer doit être considéré car les forces électromagnétiques ne se réduisent pas aux seules actions de Laplace s'exerçant sur les conducteurs traversés par des courants.
- 2015 : Il est souhaitable de préciser le rôle de l'énergie magnétique lors de l'étude des convertisseurs électromécaniques constitués de matériaux ferromagnétiques linéaires non saturés.
- 2014 : Dans le cas des machines électriques, les candidats sont invités à réfléchir au rôle du fer dans les actions électromagnétiques qui peuvent également être déterminées par dérivation d'une grandeur énergétique par rapport à un paramètre de position.

Introduction

[Tec&Doc, p. 585]

La conversion de puissance est nécessaire tout au long de la *production* (conversion), la *transmission* et l'*utilisation* de l'énergie électrique. Chaque étape met en jeu respectivement

- la conversion électromécanique (ex : alternateur, moteurs).
- la conversion électromagnétique (transformateur).
- la conversion électronique (ex : hacheur, onduleur, redresseur).

Montrer des images de la vidéos de tous les jours.

[Sylvio] Cette leçon traite de la conversion d'énergie électrique en mécanique. Concrètement cela parle des moteurs. Pourquoi faire cette leçon ? Parce que les moteurs constitue un outil essentielle dans notre vie quotidienne (électroménager), mais également à plus grande échelle (trains, machines -outils). Rien que dans une voiture on entre 10 et 100 moteurs (ventilation, essuie-glace déplacement des vitres).

L'étude de l'électromagnétisme a permis de mettre en évidence un couplage entre la mécanique et l'électricité via les forces de Laplace d'une part, et l'induction d'autre part. On va traiter ici la conversion de puissance électromécanique.

1 Principe de la conversion électromécanique

Principe basé sur :

- La force de Laplace : énergie électrique \rightarrow énergie mécanique.
- L'induction : énergie mécanique \rightarrow énergie électrique.

1.1 Bilan de puissance

[Tec&Doc, p. 596]

On s'intéresse à des porteur de charges dans un élément de volume $d\tau$.

Bilan sur porteurs de charge : $P_e + P_L = 0$. Équivalence entre puissance électrique et puissance mécanique pour un transducteur parfait.

1.2 Réversibilité

Un convertisseur est réversible si

Puissance électrique $\xrightleftharpoons[\text{gnrateur}]{\text{moteur}}$ Puissance mécanique.

1.3 Dans un transducteur réel

Utilisation de matériaux ferromagnétiques

Jury 2016 Afin de pouvoir aborder des machines électriques de forte puissance, le rôle essentiel du fer doit être considéré, car les forces électromagnétiques ne se réduisent pas aux seules actions de Laplace s'exerçant sur les conducteurs traversés par des courants.

En pratique, on utilise des matériaux ferromagnétiques afin de canaliser les lignes de champ magnétique. De l'énergie est alors emmagasinée dans le fer. Dans le cas du relais, lorsque la bobine est parcourue par un courant, le bloc subit une force attractive, quel que soit le sens du courant : **il faut la prendre en compte, en plus des forces de Laplace.**

Exemple : Le contacteur [Olive, p. 859. Dunod PSI, p. 733].

Soit faire les calculs, soit en parler de manière descriptive, (soit ne pas en parler mais l'avoir en tête).

[JF] Présentation du fonctionnement. Un noyau ferromagnétique **linéaire** fixe en forme de U est excité par une bobine de N spires parcourue par un courant d'intensité i (électro-aimant). Deux entrefers d'épaisseur x variable le séparent d'un bloc ferromagnétique mobile en translation selon Ox. On note S la section constante du circuit magnétique et l sa longueur moyenne en l'absence de l'entrefer. La bobine est constituée de N spires et parcourue par un courant $i(t)$.

[JF] Lorsque l'intensité i est nulle dans la bobine, la partie mobile ne subit aucune force. En présence d'un courant, la partie fixe se comporte comme un électroaimant, elle attire la partie mobile avec une certaine force qu'on cherche à déterminer. Établissement du champ B et de l'inductance propre par théorème d'Ampère et conservation du flux de champ magnétique.

Donner l'expression de la force obtenue en dérivant l'énergie magnétique. Faire le calcul d'ordre de grandeur : $F_{max} = -1.1kN$: permet de soulever jusqu'à 115 kg !

A savoir [Olive] Le ferro subit des contraintes mécaniques (forces de Laplace dues aux courants de Foucault) : le matériau se dilate et se contracte à 2 fois la fréquence de B (et des courants induits), générant une onde sonore.

Pertes

[wiki](#)

[Hprépa, p. 84] Jusque là, on a supposé qu'on avait pas de pertes, ce qui n'est évidemment pas le cas. On peut recenser :

- Pertes cuivre (par effet Joule).
- Pertes mécaniques par frottement.
- Pertes fer (puissances dissipées dans le matériau ferromagnétique dues d'une part au phénomène d'Hysteresie magnétique, d'autre part à la circulation des courants de Foucault).

Wiki Fuite de flux : Le circuit magnétique est considéré dans le modèle du transformateur idéal comme sans perte, ce qui serait le cas si la résistance magnétique du fer était nulle. Or ce n'est pas le cas, le flux circule donc partiellement à l'extérieur du noyau, ce flux appelé « de fuite », par opposition au flux « principal », est modélisable par une inductance en série avec la résistance de chaque enroulement.

Nous verrons deux exemples dans convertisseurs réversibles dans la suite.

2 Machine à courant continu

2.1 Définition

[Hprépa, p. 76]

Convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un **courant continu** et un dispositif mécanique.

2.2 Structure

Montrer un schéma <https://jeremy.neveu.pages.in2p3.fr/Moteurs/moteurs.html#structure-2>.

[Hprépa, p. 76. Kempf, p. 324]

Inducteur (stator) Créé le champ magnétique. C'est soit un aimant permanent (faible puissance), soit un électroaimant (grande puissance, des bobines créent le champ, c'est ce qu'on va décrire ici). Constitué de

- Culasse en acier (ferromagnétique dur), supporte toutes les parties fixes et ferme le circuit magnétique.
- Nombre paire de pôles principaux, excroissance de la culasse.
- Bobines montées en série, placées sur les noyaux des pôles principaux alimentée en courant continu.

Induit (rotor) C'est à ce niveau que sont créés les courants induits. L'armature mobile est appelé rotor. Formé de :

- Pièce métallique, siège de courants de Foucault. Permet d'assurer la continuité des lignes de champ magnétique créé par les pôles principaux. Formée de tôles fines isolées les unes des autres et collés (pour limiter les courants de Foucault), et faites dans un ferro doux pour diminuer les pertes par hystérésis.

- Bobinage : deux fils conducteurs placés de part et d'autre du rotor forment une spire. Le rotor est alimenté en courant continu.

N.B. Ce qu'il faut retenir : Pour obtenir des champs forts, le stator est réalisé avec des ferro. L'entrefer entre induit et inducteur doit être étroit pour limiter les pertes de flux. Si deux pôles (nord et sud) machine bipolaire. On peut avoir machines multipolaires ($2p$, $p > 2$, p pôles nords alternés avec p pôles sud). Les machines de faible puissance ne possèdent pas de circuit inducteur. Le champ est créé par des aimants permanents.

A savoir Un électro-aimant produit un champ magnétique lorsqu'il est alimenté par un courant électrique : il convertit de l'énergie électrique en énergie magnétique. Il est constitué d'un bobinage et d'une pièce polaire en matériau ferromagnétique doux appelé cœur magnétique qui canalise les lignes de champ magnétique.

2.3 Champ magnétique

[Kempf, p. 325] L'entrefer est la région où sont logés les conducteurs du rotor (induit). La forme des pièces est telle que B est radial dans l'entrefer. Montrer les lignes de champ (pôle nord, traversent l'entrefer, rotor où elles sont canalisées, à nouveau l'entrefer, pôle sud, et retournent par le stator au pôle nord).

[Dunod PSI, p 808] B permanent, plan de symétrie, résolution numérique.

2.4 Principe de fonctionnement

Montrer la vidéo <https://www.youtube.com/watch?v=A3b3Km5KVXs&t=42s>

- Machine simplifiée (bipolaire).
- Champ magnétique créé par l'inducteur $B(R, \theta)u_r$ (faire le schéma de [Tec&Doc psi, p. 600]).
- Rotor = une spire.
- Le rotor est le siège d'induction de Lorentz (circuit mobile dans un champ stationnaire).
- Lorsque le rotor tourne, il apparaît une f.e.m. S'il est parcouru par un courant, le conducteur subit alors une force de Laplace : $Idl \wedge B$. On a une force qui fait tourner le rotor.
- Couple moteur et fem $e = -\phi\omega$, $C = \phi i$.

Rôle du collecteur

[Kempf, p. 328. Dunod PSI, p.810]

Animation : https://sitelec.org/applets/walter_fendt/electricmotor_f/electricmotor_fr.html

On change le sens du courant dans le rotor de sorte que la force de Laplace soit toujours dans le même sens.

Transition Mise en équation.

[Tec&Doc PSI, p. 600] Schéma spire.

Aspects mécaniques

Forces de Laplace sur chaque portion de la spire. Vitesse de rotation $v = r\omega u_\theta$. d Diamètre de la spire. Moment de ces forces : $\Gamma = \frac{d}{2}u_r \wedge F + (-\frac{d}{2})u_r \wedge F = diLBu_z$, soit sa valeur algébrique $C = idLB = MB$. Puissance mécanique $P_m 2F \cdot v = C\omega$.

N.B. Un couple est un ensemble de forces de résultante nulle, dont en revanche le moment total n'est généralement pas nul. Il est donné par $\Gamma = r \wedge F$, où r est le bras de levier, c'est-à-dire le vecteur de la distance entre le point de rotation (ou l'axe) et la ligne d'action de la force.

Aspects électriques

IMPORTANT : faire attention aux conventions !

Champ électromoteur. fem $e = -dLB\omega$. Schéma électrique équivalent. Puissance électrique $P_e = -ei = P_m$.
N.B.

- En convention récepteur, $P = Ui$ doit être interprétée comme la puissance **consommée** par le dipôle. Une puissance positive est alors physiquement consommée, alors qu'une puissance négative est physiquement produite.
- En convention générateur, $P = Ui$ doit être interprétée comme la puissance **produite** par le dipôle. Une puissance positive est alors physiquement produite, alors qu'une puissance négative est physiquement consommée.

Machine réelle

[Tec&Doc, p. 602. H-prépa, p. 81] Plusieurs spires. $e \propto -\phi\omega$. Couple $C \propto \phi i$.

Modes de fonctionnement

Fonctionnement en générateur pour fournir de l'énergie électrique, de l'énergie mécanique doit être transformée en énergie électrique $ei > 0$ (convention générateur).

Fonctionnement en moteur Le système consomme de la puissance électrique : $ei < 0$.

2.5 Etude expérimentale en fonctionnement moteur

Relation entre la tension et la vitesse de rotation

Un grand intérêt du moteur à courant continu est de pouvoir commander la vitesse de rotation via la tension à ses bornes U car la dépendance entre les deux est affine : $u = Ri + \phi\omega$.

Manip' : [TP moteurs]

On propose de vérifier dans un premier temps cette relation tension-vitesse à masse fixée en faisant varier la tension d'alimentation dans un domaine raisonnable : on ne dépassera jamais 12 V, et on n'imposera pas non plus des tensions trop faibles (à juger selon la charge imposée, ne pas aller en dessous de 8 V pour les grandes charges). Vérifier également que le courant ne prend pas des valeurs trop importantes.

On trace $U(\omega)$ avec $\omega = \frac{v}{r}$.

Rendement et bilan de puissance

Cela semble déraisonnable de faire cette partie avec l'expérience complète associée. Mais si jamais, voir [Dunod psi, p. 818]. $\eta = \frac{P_u}{P_e} = \frac{C_u\omega}{ui}$.

Manip' Mesure du rendement (à la puissance nominale).

Faire la manip' avec seulement une unique mesure (v et u) puis en déduire le rendement.

A savoir le point de fonctionnement se trouve à l'intersection de son couple électromécanique $C(\omega)$ et de son couple mécanique $C_r(\omega)$.

2.6 Applications

Jouets, essuie-glaces, des ventilateurs, des machine-outils, dans certaines lignes de métro, RER et TGV.

2.7 Avantages et inconvénients

(+) : Capacité de variation de vitesse.

(-) : [Tec&Doc, p. 608]

Transition On a vu les MCC qui se basent sur l'induction de Lorentz. On va voir un autre type qui utilise l'induction de Von Neumann.

3 Machines à courant alternatif (synchrone)

Ça va dépendre du temps, au pire la faire vite fait en conclusion...

3.1 Champ magnétique tournant (triphase)

https://sitelec.org/flash/champ_magnetique_tournant.htm

En utilisant l'animation (appuyer à chaque fois sur (I)), on illustre les notions de [Tec&Doc psi, p. 608].

La machine synchrone est basée sur ce principe

- Stator : crée le champ tournant.
- Rotor : aimant ou électroaimant (alimenté par un courant continu).

3.2 Fonctionnement en moteur

[Hprépa, p.106. Kempf, p. 334, Tec&Doc, p. 611] Calculer l'expression du couple $C(\theta)$. Discuter le cas moteur et résistif.

Démarrage

[Kempf, p. 334, Tec&Doc, p. 613].

3.3 Fonctionnement en générateur (alternateur)

[Kempf, p. 334. Tec&Doc, p. 610] Le rotor tourne à l'aide d'un dispositif annexe, induisant dans les bobines du stator une fem alternative.

3.4 Fonctionnement en générateur

3.5 Avantages et inconvénients

+ : facilement commandable en vitesse par la vitesse de rotation du champ statorique car les deux vitesses sont égales.

- : son couple au démarrage est de valeur moyenne nulle (car le rotor n'a pas encore accroché le champ statorique et sans couple il ne peut commencer à vaincre le couple de charge).

3.6 Applications

Production d'énergie électrique dans les centrales de grande puissance.

Moteurs synchrones autopilotés : TGV Atlantique, propulsion de gros navires, malaxeurs de l'industrie chimique.

Conclusion

Avantages/inconvénients MCC vs MCA. Lire [Hprépa, p. 111 et p. 113].

Ouverture sur le moteur asynchrone [Hprépa] :

+ : n'a pas, a priori, de problème de démarrage.

On les trouve dans toutes les applications industrielles et domestiques correspondantes : machines outils, congélateurs, machines à laver, pompes diverses, etc.

Ouverture sur d'autres types de moteurs.

Description de l'expérience

Expérience

Matériel

- Chronomètre
- Masses
- MCC
- Alimentation variable (12V, 0.5A)
- Grande règle
- Fils
- Ampèremètre
- Voltmètre
- Interrupteur inverseur
- Serre-joint
- Mousse
- Écran
- Pied à coulisse

Protocole

- ▷ On laisse suffisamment d'espace au sol pour que la masse atteigne son régime stationnaire
- ▷ On mesure le temps entre deux points de l'écran de distance connue (par exemple 30cm) en montée
- ▷ Faire la manip' à la tension nominale $U = 12V$

Aspect quantitatif : Tracer à U fixée pour différentes masses $\eta(P_u)$ avec $\eta = \frac{P_u}{P_e}$ où $P_e = UI$ est la puissance électrique fournie et $P_u = \Gamma_u \Omega = mgv$ est la puissance utile.

Le point de fonctionnement nominal, point de fonctionnement « normal » prévu par le constructeur (dont les valeurs typiques des différents paramètres est indiqué dans la notice et directement sur l'appareil), correspond généralement au point de fonctionnement de rendement maximal. Vérifier si c'est le cas ici.

Glossaire

- **Actionneur** : objet qui transforme l'énergie qui lui est fournie en un phénomène physique qui fournit un travail, modifie le comportement ou l'état d'un système.

- **Contacteur électromagnétique** : appareil électrotechnique destiné à établir ou interrompre le passage du courant, à partir d'une commande à distance, électrique ou pneumatique. Relais électromagnétique qui permet de faire la liaison entre un circuit de commande et un circuit de puissance. Il permet d'ouvrir ou fermer un circuit automatiquement pour piloter certains appareils électriques (moteurs, résistances, etc). Il fonctionne comme un interrupteur à l'intérieur d'un circuit en établissant ou en interrompant le passage du courant.
- **Relais électromécanique** : organe électrique permettant de distribuer la puissance à partir d'un ordre émis par la partie commande. Ainsi, un relais permet l'ouverture et la fermeture d'un circuit électrique de puissance à partir d'une information logique.

10

Induction électromagnétique

Niveau : L3

Prérequis :

- Equations de Maxwell
- Forces de Lorentz, de Laplace
- ARQS magnétique
- Potentiels scalaire et vecteur
- Électromagnétique

Bibliographie :

- Electromagnatisme 3 : magnétostatique, induction, équations de Maxwell et compléments électroniques. M. Bertin, J. P. Faroux, J. Renault. Dunod Université (1986)
- Physique Spé. MP*, MP et PT*, PT. Hubert Gié, Jean-Pierre Sarmat, Stéphane Olivier, Christophe More. Editions Tec&Doc (2000)
- Physique Spé. PSI*, PSI. Stéphane Olivier, Christophe More, Hubert Gié. Editions Tec&Doc (2000)
- Électromagnétisme PC-PSI. Les nouveaux Précis. Bréal. Krempf.

Introduction

Poser dès le début le cadre générale de la leçon : ARQS magnétique

[Slide] **Introduction historique** : Oersted (1820) : courants électriques induisent \mathbf{B} . Faraday (1831) : Variations de \mathbf{B} qui induisent des courants électriques.

1 Approche expérimentale

1.1 Expérience introductive

Approche un aimant et éloigne un aimant droit d'une bobine fixe branchée à un oscilloscope : apparition d'une tension. Même observation avec déplacement de la bobine dans aimant fixe. Amplitude de l'intensité proportionnelle à la vitesse de variation de \mathbf{B} .

Bien exploiter la première expérience (aimant mobile dans une bobine) pour montrer que la fem dépend du flux du champ magnétique (retourner l'aimant, changer le nombre de spires, le bouger tangentielllement à la bobine plutôt que le long de la bobine) et de sa variation temporelle (aller plus ou moins vite).

Observations

A l'oral :

- Apparition de la fem si l'aimant ou la bobine bouge
- La fem dépend du flux du champ
- La fem dépend de la variation temporelle du flux

1.2 Définition

Consiste en l'apparition d'une f.e.m et, s'ils peuvent s'écouler, de courants, dans un conducteur mobile placé d'un champ magnétique variable.

1.3 Deux types d'induction

- Induction de Neumann (circuit fixe, champ variable)
- Induction de Lorentz (circuit mobile, champ stationnaire).

1.4 Loi de Faraday

- $e = -\frac{d\phi}{dt}$
- Validité : circuits filiformes
- Rappel définition du flux : $\phi = \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$
- unités de e et ϕ , convention d'orientation de la surface par rapport au circuit (règle de la main droite)
- Convention générateur de la f.e.m.

1.5 Loi de Lenz

Discussion du signe – dans la loi de Faraday.

Manip' qualitative chute d'un aimant dans un tube conducteur.

2 Théorie de l'induction

2.1 Définition formelle de la fem

$$e = \frac{1}{q} \oint \mathbf{F}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{l}.$$

Bien discuter la cohérence de cette définition en terme d'interprétation physique (cf. Tec&Doc).

Ici : \mathbf{F} force de Lorentz $\rightarrow e = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} + \oint (\mathbf{B} \wedge \mathbf{v}) \cdot d\mathbf{l}$.

2.2 Induction de Neumann

$$\mathbf{v} \parallel d\mathbf{l} \rightarrow e = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}.$$

Équation de Maxwell-Faraday : $\nabla \wedge \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ donne la loi de Faraday.

Notion de champ électromoteur

$$\mathbf{E} = -\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \rightarrow e = \oint \mathbf{E}_m \cdot d\mathbf{l} \text{ où } E_m = -\frac{\partial A}{\partial t} \text{ est le champ électromoteur de Neumann.}$$

Et pour l'induction de Lorentz ?

2.3 Induction de Lorentz

Non relativiste : $\mathbf{v} = \mathbf{v}_r + \mathbf{v}_e$, $\mathbf{v}_r \parallel d\mathbf{l}$

$$\mathbf{E} = -\nabla V.$$

$e = \oint (\mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l}$. Le terme $\mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B}$ se substitue au champ électromoteur de Neumann.

Selon le temps : le faire proprement ou à l'oral : montrer qu'en utilisant l'équation de Maxwell-Flux, on retrouve la loi de Faraday. **Éventuellement faire le calcul pour le rails de Laplace et admettre la généralisation.**

3 Aspects pratiques

Dessin spire avec ligne de champ.

Flux propre : $\phi_p = Li$, L inductance propre (H).

f.e.m : $e = -L \frac{di}{dt}$.

Schéma équivalent en électrocinétique : convention générateur avec générateur, convention récepteur avec bobine.

- **Expérience quantitative 1 : Mesure de L** : Circuit RL, mesure du temps caractéristique sur oscilloscope.

4 Induction mutuelle

Dessin spire 1 avec ligne de champ et spire 2 dans champ magnétique créé par spire 1.

- Flux créé par spire 1 à travers spire 2 : $\phi_{21} = M_{21}i_1$;

- Flux créé par spire 2 à travers spire 1 : $\phi_{12} = M_{12}i_2$;

- $M_{12} = \oint \oint \frac{\mu_0 d\mathbf{l}_1 \cdot d\mathbf{l}_2}{4\pi r_{12}} = M_{21}$.

5 Exemple d'application : le transformateur

Modèle du transformateur parfait. Faire le schéma équivalent.

Manip' qualitative

Montrer la tension du secondaire.

Conclusion

Conclusion Applications diverses (on a vu bobines et transformateurs).

Autres applications (slides) : Plaques à induction, Freinage par induction.

Description de l'expérience

Expérience

Matériel

— Chronomètre

Manip 1

— Aimant droit
— Bobine de Leybold
— Oscilloscope

- Câbles et fils

Manip 2

- Tube conducteur + aimant
- 2 Bobines de Leybold (250 et 500 spires)
- GBF
- Fils et câbles
- RLC-mètre
- Multimètre (ohmmètre)
- T.
- Amplificateur de puissance (pour pas que le signal du GBF soit déformé).

Protocoles

Protocole 1 Mettre l'échelle adéquate pour l'oscilloscope (ex : 200mV, 500ms). Faire les mesures en Single.

On peut bien exploiter la première expérience (aimant mobile dans une bobine) pour montrer que la fem dépend du flux du champ magnétique (retourner l'aimant, changer le nombre de spires, le bouger tangentiellement à la bobine plutôt que le long de la bobine) et de sa variation temporelle (aller plus ou moins vite).

On peut savoir si c'est une tension négative en premier ou en deuxième en regardant le sens du bobinage (dessiné sur la bobine). A partir de là, le sens des lignes de champ de l'aimant étant connu, on peut connaître le signe du flux et de sa variation temporelle, et ainsi connaître le signe de la tension aux bornes de la bobine.

Protocole 2

- ▷ Mesurer au préalable au ohmmètre par ex $R = 10k\Omega$ et r interne de la bobine et R du GBF OU du secondaire de l'amplificateur de puissance. Mesurer au RLC-mètre L .
- ▷ Faire le circuit GBF-L-R.
- ▷ Envoyer un créneau sur le circuit RL (ex : 5Vpp, 1kHz).
- ▷ Mesurer U_R sur l'oscilloscope
- ▷ Avec les curseurs mesurer $\tau = \frac{L}{R}$ via $U_R(\tau) = 0.63U_{max}$.

Aspect quantitatif : Mesure de L sur l'oscilloscope via τ . Faire une autre mesure au RLC-mètre. Comparer.

N.B. Y aura des déformations due à la résistance interne du GBF : **utiliser un amplificateur de puissance**. En plus y a une histoire de pont diviseur de tension selon la valeur de R , il envoie V_{pp} ou $V_{pp}/2$. En plus y a des effets capacitifs qui nous font des oscillations.

11

Rétroaction et oscillations

Niveau : PSI

Prérequis :

- Amplificateur linéaire intégré.
- Electrocinétique

Bibliographie :

- Physique PSI-PSI* Tout-en-un. Dunod.
- Physique SPÉ PSI*-PSI. Tec&Doc. Olivier, More & Gié.
- Électronique – Conversion de Puissance. PSI-PSI*. ellipses. Taupe-niveau. Meiler, Irlinger & Kempf.
- H-prépa. Électronique I PSI (vert). Brébéc et al.
- Physique PSI, Pascal Olive. ellipses.
- Précis PSI Électronique. Brenders, Buffard, Douchet, Sauzeix et Tisserand. Bréal.
- Dictionnaire de physique. Taillet
- Cours JérémY : <https://jeremy.neveu.pages.in2p3.fr/Electronique/asservissements.html>
- MANIP Bellier, p332 oscillateur de Wien
- Réussir les TP de physique aux concours. Sallen et Meier. Dunod
- http://perso.ens-lyon.fr/tristan.jocteur-monrozier-fabre/LP22-R%C3%A9troaction%20et%20oscillations/LP22_R_troaction_et_Oscillations.pdf
- Bonus : Electronique. Pérez.

Notes agrégat

- 2015 : Dans le cas des oscillateurs auto-entretenus, les conditions d'apparition des oscillations et la limitation de leur amplitude doivent être discutées. Le jury souhaiterait que le terme de résonance soit dûment justifié sans oublier une discussion du facteur de qualité. Il n'est pas indispensable de se restreindre à l'électronique.
- Jusqu'en 2013, le titre était : Rétroaction et oscillations. Exemples en physique.
- 2013 : Le jury n'attend pas une présentation générale et abstraite de la notion de système bouclé. Il estime indispensable de s'appuyer sur au moins un exemple concret et détaillé avec soin.
- 2007 : La stabilité des systèmes bouclés est mal comprise. Le bouclage ne se limite pas uniquement à une fonction d'asservissement. Le lien entre les réponses temporelle et fréquentielle est un aspect important.

Note JF Un système en boucle ouverte aussi simple soit-il n'est pas du tout satisfaisant pour une utilisation au quotidien. Pour atteindre un point de fonctionnement donné et y rester, il faut intégrer une rétroaction, on dit alors qu'on travaille en boucle fermée. Deux cas se présentent alors : soit le système est stable, le point de fonctionnement est atteint et maintenu (c'est le cas usuellement recherché dans la vie de tous les jours) ; soit le système est instable, la réponse est alternativement supérieure et inférieure à la consigne : des oscillations apparaissent. Si c'est généralement un défaut, on peut aussi le concevoir comme un but à atteindre pour certains systèmes.

Introduction

[Slide] Montrer des exemples de la vie sur la rétroaction : [Tec&Doc psi, p. 65]

- En physiologie : régulation de la température du corps (T normale \rightarrow Système nerveux \rightarrow glandes sudoripares \rightarrow Température du corps \rightarrow boucle de rétroaction vers système nerveux.
- Régulation hydroélectrique de l'organisme.
- En thermique : four.
- En électronique : amplificateur non inverseur.

Ou bien suivre avec l'exemple du chauffage central dans une habitation [Olive psi, p. 117]

Mais c'est quoi la rétroaction [Taillet, p. 654] Réintroduction d'une partie du signal de sortie d'un système à son entrée.

[Jules Fillette] L'idée de base de la rétroaction est de réinjecter tout ou une partie du signal de sortie vers l'entrée d'un opérateur. La notion de rétroaction est très générale et s'applique dans de nombreux domaines.

1 Systèmes bouclés linéaires

Définition système linéaire [Tec&Doc psi, p. 4]

1.1 Schéma fonctionnel général

[Tec&doc psi, p. 67. Précis, p. 194]

cf. <https://jeremy.neveu.pages.in2p3.fr/Electronique/asservissements.html>

[Sylvio] Un système bouclé est constitué d'une chaîne directe qui donne la sortie « naïve » en fonction de l'entrée. La sortie est récupérée pour être comparée à la commande de sorte d'ajuster la réponse. la différence en sortie du comparateur est appelée erreur. Si la sortie est trop grande alors cela va entraîner une rétroaction négative qui aura tendance à diminuer la sortie.

[Précis, p. 1966] Illustrer avec {conducteur + voiture}.

Lire [H-prépa, p. 135] pour plus de détails et pour les questions.

- une chaîne directe de fonction de transfert A contenant un actionneur.
- une chaîne de retour de fonction de transfert β qui peut contenir un capteur ou être directe ($\beta = 1$).
- un comparateur (souvent un soustracteur) qui fournit le signal de commande de la chaîne directe en comparant le signal d'entrée au signal de retour.

Calcul de la fonction de transfert.

Application à l'amplificateur non inverseur

[Jérémy, Tec&Doc psi, p. 66. Olive, p. 120]

Un montage à amplificateur opérationnel se met sous la forme d'un système bouclé, avec comparateur, chaîne directe et chaîne de retour.

Calcul de la fonction de transfert en boucle fermée :

- $A = \mu_0$
- $\epsilon = v_+ - v_-$
- $u_r = \frac{R_1}{R_1 + R_2} s$ (pont diviseur de tension)
- $\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$
- $H_{FTBF} = \frac{\mu_0}{1 + \mu_0 \beta}$.

On retrouve le résultat attendu.

1.2 Améliorations apportées par la rétroaction

H-prépa et Tec&Doc. Continuer de raisonner sur l'ALI.

Cas d'un gain élevé

[Kempf, p. 150]

A grand gain, le système se comporte comme un système en chaîne ouverte dont la fonction de transfert ne dépend que des caractéristiques de sa chaîne de rétroaction. **Intérêt** : la chaîne de rétroaction peut être fixée avec une grande précision, contrairement à la chaîne d'action (vieillesse, température, etc.).

Moindre sensibilité aux variations

[Kempf, p. 150. Tec&Doc, p. 69] Faire le calcul $\frac{dH}{H} = \frac{d\mu}{\mu} \frac{1}{1 + \beta\mu}$. Discuter. A.N. pour ALI.

Immunité aux perturbations

[Tec&Doc psi, p. 69. Kempf, p. 152]

Elargissement de la bande passante

[Tec&Doc psi, p. 70. Kempf, p. 154]

Il faut aussi s'intéresser aux performances dynamiques. On a vu que la chaîne de retour ne devait pas trop varier $B(\omega) \simeq B$. On s'intéresse à une chaîne d'action du premier ordre $A(\omega) = \frac{\mu_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$ (ce qui est vrai pour les ALIs usuels). Fonction de transfert s'écrit sous la forme $H = H_0 A(\omega) = \frac{\mu_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}}$, avec H_0 la fonction de transfert de la chaîne directe en statique, et on voit apparaître une nouvelle fréquence de coupure $\omega_c = \omega_0(1 + \mu_0 B)$. Avec $\mu_0 B \gg 1$, on peut en déduire **La rétroaction permet une augmentation importante de la bande passante du système. En temporel, cela se traduit par un accroissement sensible de la rapidité.**

Aspect temporel

[Tec&Doc, p. 73] Discuter le lien temporel. Parler d'un système du second ordre.

Transition la présence d'une rétroaction peut dans certains cas engendrer une instabilité.

1.3 Stabilité

Définition

[Kempf, p. 156] Un système physique est dit stable s'il retourne spontanément vers son état d'équilibre lorsqu'il en est écarté.

[Précis, p. 203] Un système bouclé évoluant en régime libre ($e = 0$) au voisinage de son équilibre ($s = 0$) sera dit *stable* si l'évolution de la sortie tend spontanément vers l'équilibre ($s \rightarrow 0$), *instable* dans le cas contraire.

Un système bouclé peut être stable ou instable. Lorsqu'il est instable, il peut se mettre à osciller et cette oscillation peut être exploitée pour la réalisation d'oscillateurs (objet de la première partie). Si le système bouclé est stable, il permet au contraire de réaliser une régulation, un asservissement (deuxième partie). Dans ce cas là, il convient d'éviter les oscillations du système.

Condition

[Précis, p. 203]

Condition depuis l'équa. diff. Un système linéaire permanent est stable si et seulement si la totalité des racines de l'équation caractéristique sont soit réelles négatives, soit complexes à partie réelle négative. Ceci est équivalent à :

Condition sur H : Un système asservi est stable si et seulement si tous les pôles (i.e. les zéros du dénominateur) de sa fonction de transfert en boucle fermée ont une partie réelle strictement négative. Ça se voit car les pôles sont les racines de l'équation caractéristiques en temporel.

N.B. Je pense qu'il vaut mieux faire simple et faire un cas particulier comme [Tec&Doc]. On part de l'équa diff de la partie « aspect temporel » et on en déduit le critère de Tec&Doc. Puis on dit que ça se généralise à une condition sur la fonction de transfert en boucle ouverte en disant « stable si tous les zéros de $1 + A(p)B(p)$ ont une partie réelle strictement négative [Kempf, p. 159] ».

1.4 Application aux ALIs

Pour le système bouclé $H = \frac{A}{1+AB}$. Stable si $1 + AB = 1 + H_{BO}$ si ses racines sont à partie réelle négative. [Tec&Doc, p. 76. Cours JérémY]

N.B. De manière générale, il y a une compétition entre rapidité et stabilité.

Transition [JF] Si la condition de stabilité n'est pas respectée dans le système bouclé, des oscillations peuvent apparaître : comment les rendre utiles ? Comment les maintenir ?

2 Oscillateurs

[Tec&Doc, p. 77] Oscillations peuvent résulter d'une instabilité (Si toutes les parties réelles sont nulles, le système asservi est oscillant).

2.1 Définition

(Ne pas forcément faire cette partie)

Un oscillateur est un système bouclé auto-oscillant, c'est-à-dire qui oscille sans requérir de signal d'entrée.

On distingue deux types d'oscillateurs :

- les oscillateurs quasi-sinusoïdaux, tels que le signal de sortie soit presque sinusoïdal.
- les oscillateurs à relaxation, délivrant un signal périodique non sinusoïdal.

Un oscillateur quasi-sinusoïdal est un oscillateur qui génère un signal comprenant un harmonique principal et des harmoniques secondaires à faible effet sur le signal sinusoïdal. La forme du signal est alors proche d'une sinusoïde (dite quasi sinusoïde).

3 Oscillateur à boucle de rétroaction

[Tec&Doc, psi. Précis, p. 237. Hprépa I, p. 180]

Faire le schéma e - amplificateur - s - quadripôle.

ex : Laser.

On va tout illustrer sur l'oscillateur à pont de Wien.

3.1 Oscillateur à pont de Wien

[H-prépa] ALI non inverseur + pont de Wien

On étudie ici les oscillateurs constitués d'un amplificateur et d'un passe-bande, bouclés car la sortie de l'un est l'entrée de l'autre, et vice versa.

3.2 Condition d'oscillations

[Tec&Doc, p. 79] Dériver l'équation différentielle. N.B. La deuxième équation sur i s'obtient en faisant le schéma équivalent avec les impédances complexes : $e = Zi$ avec $Z = \frac{1}{1+j\omega RC}$. Solution sinusoïdale si $A = 3$, fréquence d'oscillation $\omega = \frac{1}{RC}$.

Expérience vérifier le critère et mesurer f . Voir TP systèmes bouclés et [Hprépa, p. 158] pour d'autres manip's'.

Critère de Barkhausen

Le critère de stabilité de Barkhausen fixe une condition nécessaire pour qu'un circuit consistant en un amplificateur et une boucle de contre-réaction, se mette spontanément à osciller. Ce critère ne permet cependant ni d'affirmer que les oscillations seront durables, ni qu'elles seront d'amplitude constante. Ce critère marque les débuts de l'étude des circuits oscillants ; sa portée a depuis été précisée par d'autres critères, comme le critère de Nyquist.

N.B. Le critère de stabilité de Nyquist est une règle graphique utilisée en automatique et en théorie de la stabilité, qui permet de déterminer si un système dynamique est stable. Cette construction, qui exploite le diagramme de Nyquist (Im H vs Re H en cartésien, ou G vs \arg en polaire) des circuits à boucle ouverte, permet de se dispenser du calcul des pôles et des zéros des fonctions de transfert (bien qu'il faille connaître le nombre et le type des singularités du demi-plan réel).

Critère du revers : Si un système linéaire est stable en boucle ouverte, une condition nécessaire et suffisante de stabilité asymptotique du système en boucle fermée est qu'en parcourant le lieu de Nyquist H_F dans le sens des pulsations croissantes, on laisse le point critique -1 à gauche.

Critère de Nyquist : Un système asservi de fonction de transfert en boucle ouverte H_O est asymptotiquement stable en boucle fermée à la condition nécessaire et suffisante que H_F entoure le point critique -1 dans le sens trigonométrique un nombre T de fois égal au nombre de pôles P instables (à partie réelle positive) de H_F .

Portrait de phase

Lire [Précis] à partir de la p. 245

Si le temps, on peut faire ça.

On peut aussi parler des autres oscillateurs (résistance négative, etc.).

Conclusion

Oscillateur à relaxation ? Oscillateur à quartz [Jérémy] ? Laser ?

A savoir [Agrégat]

- Caractéristique principale des systèmes bouclés : Produit gain * bande passante = cste.
- Qu'est-ce qui limite l'amplitude des oscillations dans l'oscillateur à pont de Wien ? Effets non linéaires.
- D'où viennent les non linéarités ? L'AO (transistors de l'AO).
- Que se passe-t-il si on modifie la valeur de la résistance variable dans l'oscillateur à pont de Wien ? Déformation du signal, on s'éloigne des oscillations quasi sinusoïdales.
- Qu'est-ce qui caractérise un oscillateur ? Son facteur de qualité.
- Que vaut-il pour l'oscillateur à pont de Wien ? (1/3).
- Un système linéaire continu et stationnaire n'est qu'une modélisation, les systèmes réels ne satisfont pas rigoureusement tous ces critères.

Description de l'expérience

Suivre le montage de H-prépa électronique I p.183-184.

Expérience

Matériel

- 4 boîtes à décades R (Attention ! Il faut qu'au moins 2 soient réglables)
- 2 boîtes à décade C
- 1 ALI
- Alimentation pour ALI
- Câbles/fils
- Oscilloscope + câbles
- Multimètre (ohmmètre)
- RLC-mètre
- Chronomètre

Protocole

- ▷ Faire le montage.
- ▷ $R_2 = 10k\Omega$, $R_1 = 4966\Omega$? Prendre les valeurs de Hprépa ou du livre de TP. Les mesurer au préalable au ohmmètre. Mesurer C au RLC-mètre.

Aspect quantitatif : Montrer que les oscillations commencent à $G = 3$ (critère de Barkhausen). Mesure de f . Vérifier que $f = \frac{1}{2\pi RC}$.

Autres manip' On peut utiliser un circuit dérivateur (passe-haut RC) [Hprépa, p. 184] pour tracer le portrait de phase en mode XY.

[TP Systèmes bouclés + livre TP] On peut aussi étudier le filtre de Wien : mesure de Q et de la fréquence de résonance. A la résonance $\omega = \frac{1}{RC}$, $\arg(H) = 0$: s et e sont en phase : on peut déterminer la fréquence de résonance en mode XY (e en X et s en Y). Pour déterminer Q , on cherche f_1 et f_2 de part et d'autre de f_0 telles que $s = \frac{v_{s,max,res}}{\sqrt{2}}$.

12

Traitement d'un signal. Étude spectrale

Niveau : CPGE

Prérequis :

—

Bibliographie :

- Traitement des signaux et acquisition de données. Francis Cottet. Dunod.
- Pascal Olive. Physique-chimie en PSI/PSI*. ellipses.
- Sanz. Toute en un physique. **MP et PSI**.
- Tec&Doc. Physique MP. Gié et al.
- H-prépa. Électronique 2ème année. PSI. Brébec et al.
- Les nouveaux précis. Tout-en-un Physique PSI-PSI*. Tisserand et al. Bréal.
- Expériences de physique : électricité, électromagnétisme, électronique, transferts thermiques. Bellier, Bouloy et Guéant. Je Prépare. 4ème édition

Introduction

Signal : définition

Un signal est une représentation physique d'une grandeur mesurable porteuse d'information. Exemple : pression, température, tension, intensité, etc.

Traitement du signal : définition

[Sur slide] Discipline qui a pour objet l'élaboration ou l'interprétation ou l'analyse des signaux. Parmi les types d'opérations possibles : filtrage, compression, transmission de données, réduction du bruit, etc.

Exemples d'opération du traitement du signal

- Élaboration : modulation.
- Interprétation : filtrage.
- Analyse : transformée de Fourier.
- Mesure : valeur moyenne.

Analogique vs numérique

1 Étude spectrale d'un signal

[Tec&Doc, p. 33]

<https://femto-physique.fr/omp/serie-de-fourier.php>

1.1 Décomposition d'un signal en série de Fourier

Décomposition d'un signal périodique. Définir spectre. [Hprépa].

Principe de superposition

Intérêt des sinus dans les systèmes linéaires (principe de superposition).

Transition Nous verrons dans la suite l'action d'un filtre linéaire sur un signal périodique.

1.2 Filtrage (linéaire)

<https://femto-physique.fr/electrocinetique/filtrage-passif.php>

<https://femto-physique.fr/simulations/filtrage-passe-bas.php>

[Sanz MP, chapitre 4] Faire pour un sinus puis pour un signal périodique quelconque.

Filtre passe-bas Diagramme de Bode. Composition spectrale.

Manip' quantitative

Filtre passe-bas RC. On envoie un carré ou un triangle, on récupère un triangle ou un sinus. Tracer diagramme de Bode sur Qtiplot. Faire le fit -2 dB/décade. Mesurer fréquence de coupure et comparer avec la théorie.

Transition [Sanz MP] On a vu qu'un filtre, système linéaire, n'enrichit pas le contenu spectral du signal. En revanche, si la relation entre le signal d'entrée $e(t)$ et le signal de sortie $s(t)$ d'un système est non linéaire, il est possible que le spectre du signal de sortie contienne des fréquences absentes du signal d'entrée.

2 Modulation et démodulation d'amplitude (non linéaire)

<https://jeremy.neveu.pages.in2p3.fr/Electronique/modulation.html#>

[Cottet, chapitre 3, p. 43 et p. 80. Sanz PSI, Chapitre 6]

2.1 Principe de la modulation

2.2 Principe de la démodulation

Manip' qualitative

Modulation (multiplication du signal modulant et de la porteuse). FFT pour montrer le spectre du signal modulé. Puis démodulation par détection synchrone (en utilisant le filtre passe-bas de la section précédente).

Transition On a traité jusque là que des signaux analogiques.

3 Conversion analogique-numérique

[Sanz MP et PSI. Cottet] <https://jeremy.neveu.pages.in2p3.fr/Electronique/numerique.html#>

3.1 Échantillonnage

Définition. Spectre. Critère de Shannon et repliement du spectre.

https://perso.ens-lyon.fr/sylvio.rossetti/AGREG/LP/LP23_Aspects%20analogique%20et%20num%e9rique%20du%20traitement%20du%20signal.%20Etude%20spectrale/LP23_Aspects_analogique_et_num_rique_du_traitement_du_signal__Etude_spectrale.pdf

3.2 Filtrage numérique

[Sanz MP et PSI] Une fois le signal échantillonné, on peut effectuer sur lui des traitements en s'appuyant sur la puissance de calcul du calculateur. Un filtre numérique est un dispositif qui effectue des opérations mathématiques sur un signal discret échantillonné.

4 Avantages

[Cottet, Sanz MP et PSI]

Conclusion

On peut parler de TF, application à la diffraction. TFD, FFT pour traiter les signaux numériques (équivalent discret de la transformation de Fourier (continue) utilisée pour traiter un signal analogique)? https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformation_de_Fourier_discr%C3%A8te

Donner d'autres applications hors électronique. Voir par exemple les approches documentaires de Dunod.

A connaître : notion de fenêtrage [wiki] En traitement du signal, le fenêtrage est utilisé dès que l'on s'intéresse à un signal de longueur volontairement limitée. En effet, un signal réel ne peut qu'avoir une durée limitée dans le temps ; de plus, un calcul ne peut se faire que sur un nombre fini de points. Pour observer un signal sur une durée finie, on le multiplie par une fonction fenêtre d'observation. La plus simple est la fenêtre rectangulaire (ou porte). Lire Cours Jérémy.

Description de l'expérience

Expérience

Matériel

Pour le filtre PB

- Câbles BNC/BNC (suffisamment $\times 10$?)
- 2 multiplieurs analogiques
- 2 alimentations pour multiplieurs ($\pm 15V$)
- Câbles d'alimentation
- Câbles et fils (suffisamment)
- 4 cavaliers + « ponts »
- Plusieurs « T »
- 2 GBF

- 1 boîte C
- 1 boîte R

Filtre PB [Bellier et. al.]

- ▷ Circuit RC en série. $R = 10k\Omega$, $C = 100nF$.
- ▷ Pour différentes fréquences : mesurer la tension aux bornes du condensateur V_c^{pp} . On utilise « Meas » et on moyenne sur plusieurs périodes, surtout pour les hautes fréquences avec « acquire ».
- ▷ Tracer sur Qtiplot $G(\omega) = 20 \log \frac{V_c^{pp}}{V_e^{pp}}$ (échelle log/log en abscisse).
- ▷ Si motivé, on peut aussi tracer $\varphi(\omega)$ avec Meas.

Aspect quantitatif : Mesure de ω_c . Vérifier qu'elle est égale à $\frac{1}{RC}$. Faire le fit -20 dB/déc après la fréquence de coupure (attention : modéliser par $A \times \log(x) + B$ à cause de l'échelle log).

Modulation/démodulation

- ▷ Suivre le schéma du poly.
- ▷ Pour la modulation : FFT.
- ▷ Pour la démodulation : par détection synchrone. Montrer qu'on récupère le bon signal (i.e. la bonne fréquence).

Aspect quantitatif : Mesurer les fréquences du signal modulé avec la FFT. Montrer que ça vaut bien $f_0 \pm f_p$.

13

Ondes progressives, ondes stationnaires

Niveau : PC

Prérequis :

- Mécanique (première année)
- Équation différentielle, développements limités, etc.
- Notion de résonance, modes et pulsations propres

Bibliographie :

- Les nouveaux précis. Tout-en-un Physique PC-PC*. Tisserand et al. Bréal.
- Physique Spé PC-PC*. Olivier, Gié, Sarmant. Tec & Doc.
- Tout-en-un PC, Sanz.
- H-prépa Ondes 2ème année MP-PC-PSI. Brébec. Hachette Supérieur.
- Ondes 2ème année PC-MP-PSI-PT. Classe Prépa. Nathan. Hulot et Venturi.
- Expériences de Physique. Optique, mécanique, fluides, acoustique. Béllier, Bouloy, Guéant. 4e édition.
- Dictionnaire de physique. Taillet, Villain, Febvre.
- Voir JF <https://www.lpens.ens.psl.eu/jfillette/>
- Animation : https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/ondes_stationnaires/melde.php
- Animation : https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Ondes/ondes_stationnaires/stationnaires.php

N.B. Les deux parties doivent être équilibrées. L'équivalence entre les deux types d'onde doit être au coeur de la leçon. Idéalement, faire une manip' (qualitative) sur les ondes progressives.

N.B. Reprendre les définitions en utilisant le Taillet.

Introduction

Sur slide : images d'ondes (surface de l'eau, lumière, onde acoustique).

1 Généralités sur les ondes

1.1 Définition

Définir une onde sur slide.

1.2 Équation de propagation : établissement pour la corde vibrante

Il faut essayer d'être rapide sur cette partie, au pire mettre l'équation de d'Alembert en prérequis :

Hypothèses

- Corde inextensible de masse linéique μ .
- On néglige le poids de la corde.

Mise en équation

PFD sur un élément de corde. α petit. Dérivation de l'équation de d'Alembert (1d).

Propriétés

- Linéaire
- Réversible
- Généralisation 3d.

1.3 Solutions de l'équation de d'Alembert

Deux familles de solutions : ondes planes progressives et ondes stationnaires. C'est ce qu'on va étudier dans la suite et voir qu'elles sont équivalentes.

2 Solutions stationnaires

2.1 Définition

Onde dont les dépendances spatiales et temporelles sont découplées.

2.2 Exemple : la corde de Melde

Selon le temps, résoudre plus ou moins : $y(x, t) = A \cos(\omega t - \varphi) \cos(kx - \psi)$.

Donner les CL : $y(0, t) = y_0 \cos(\omega t)$ et $y(L, t) = 0$. Donne :

$$y(x, t) = y_0 \cos(\omega t) \frac{\sin(k(L - x))}{\sin(kL)} \quad (2.1)$$

Pulsations de résonance : $\omega = \frac{n\pi c}{L}$. Fréquences de résonance : $f_n = \frac{nc}{2L}$, avec $c = \sqrt{\frac{mg}{\mu}}$.

Justifier que ça ne diverge pas dans la vraie vie (dissipation).

Expérience

Corde de Melde. Tracer $f(n)$. A l'extrémité de la corde, la tension vaut $T_0 = Mg$.

<https://nc.agregation-physique.org/index.php/s/AW9cDjFHrQMaRmW?dir=undefined&path=%2FLyon&openfile=48964>

Lire [Exo Dunod PCSI, exo 21.2 Chapitre 21 : Poulie] La poulie est soumise à l'action de la liaison pivot d'axe (Oz), à la force exercée par l'opérateur, à la traction exercée par le fil et à son poids. La poulie est à l'équilibre lorsque la somme des moments de toutes ces forces par rapport à l'axe de rotation (Oz) est nulle.

[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Classical_Mechanics/Classical_Mechanics_\(Dourmashkin\)/08%3A_Applications_of_Newtons_Second_Law/8.05%3A_Tension_in_a_Rope](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Classical_Mechanics/Classical_Mechanics_(Dourmashkin)/08%3A_Applications_of_Newtons_Second_Law/8.05%3A_Tension_in_a_Rope)

Transition On a vu les ondes stationnaires. En vrai, somme de deux ondes progressives (Le dire sur la corde de Melde).

3 Solutions progressives

3.1 Définition

Onde ne dépendant que de la variable $x \pm ct$.

3.2 Solution générale (théorème)

$$y(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct).$$

Montrer que c'est bien une solution de l'équation de d'Alembert en la dérivant deux fois par rapport à x et t et en l'injectant dans l'équation.

f (resp.) g pour propagation dans le sens des x croissants (resp. décroissants).

La recherche des ces fonctions est compliquée, un moyen de simplifier la résolution est de décomposer en série de Fourier.

Elles sont utilisées pour décomposer des OPP (puisque l'équation de d'Alembert est linéaire).

3.3 Onde plane progressive harmonique (OPPH)

Définition

Onde plane progressive dont la dépendance en temps est sinusoïdale : $y(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi)$.

Relation de dispersion

La question qui se pose alors est de déterminer les caractéristiques de chaque OPPH. Pour ça il faut établir le lien entre k et ω , appelé relation de dispersion. La déterminer pour d'Alembert en dérivant deux fois l'expression d'une OPPH par rapport à x et t et en injectant dans l'équation de d'Alembert. Définir vitesse de phase.

Conclusion

Équivalence des deux solutions : **Selon le temps, soit le dire à l'oral soit faire les démos.**

Une onde stationnaire est la superposition de deux OPPH (donc solution de d'Alembert).

De même, les ondes progressives peuvent aussi s'écrire comme somme d'ondes stationnaires.

On choisit l'une ou l'autre selon le système étudié et les CLs. Ex : OPP pour corde infinie et OS pour corde fixée.

Description de l'expérience

Expérience

Matériel

- GBF
- Amplificateur de puissance
- Fils et câbles
- Vibreur
- Corde

- Poulie
- Potence
- Noix
- Masses
- Balance
- Mètre
- Serre-joint
- Chronomètre

Protocole

- ▷ Déterminer la masse volumique de la corde.
- ▷ Modifier la fréquence. Estimer l'incertitude. Trouver les modes propres.
- ▷ Tracer $f(n)$. Idéalement vs la longueur d'onde mesurée à la règle plutôt que n .
- ▷ Idéalement, utiliser un stroboscope.

Aspect quantitatif : Mesure de c via deux méthodes : $f(n)$ et $\sqrt{\frac{mg}{\mu}}$.

14

Ondes acoustiques

Niveau : 2ème année CPGE

Prérequis :

- Équation de D'Alembert et bases de solution (ondes planes progressives/ondes stationnaires).

Bibliographie :

- Physique Spé. PC-PC* ou PSI-PSI*. Tec&Doc. Olivier, More, Gié.
- Ondes 2ème année PC-PSI. H-prépa. Brébec, Desmarais.
- Tout-en-Un Physique PC. Sanz et al.
- Dictionnaire de physique. Taillet.
- Physique expérimentale : électricité, électromagnétisme, électronique, acoustique. 3ème édition. Bellier, Bouloy et Guéant. DUNOD

Introduction

Le son est un phénomène de la vie de tous les jours. Et si aujourd'hui, vous pouvez m'entendre, c'est parce que le son se propage.

Qu'est-ce que le son ? Comment se propage-t-il ? C'est ce que nous allons voir.

Définir une onde acoustique (sur slide) : [H-prépa] Les ondes sonores sont des vibrations de faible amplitude du milieu matériel dans lequel elles se propagent à la vitesse c_s .

Exp de la cloche à vide -> le son a besoin d'un milieu pour se propager.

2'04 : <https://www.youtube.com/watch?v=BC9Pod4cnpk>

Passer plus du temps pour bien expliquer la cloche à vide

1 Propagation dans les fluides

[tec&Doc]

1.1 Équation fondamentale des ondes sonores

Il faut s'entraîner à savoir bien refaire les calculs. Il faut aller plus vite sur cette partie pour avoir le temps de faire la partie sur l'énergie.

Hypothèses

Bien poser toutes les hypothèses (cf. M. Rabaud).

- Écoulement parfait
- On néglige la pesanteur
- Au repos : μ_0 et p_0 uniformes et constants. v_0 nul.

Onde sonore = perturbation de l'état de repos pour v , P et μ .

Approximation acoustique = à l'ordre 1. L'approximation acoustique est une approximation de grande longueur d'onde.

p_1 = surpression.

Avoir en tête l'équilibre thermodynamique local

1.2 Linéarisation des équations

- Euler : $\mu_0 \frac{\partial v_1}{\partial t} = -\nabla p_1$
- Conservation de la masse $\mu_0 \nabla \cdot v_1 + \frac{\partial \mu_1}{\partial t} = 0$
- Évolution thermodynamique : isentropique. Coefficient de compressibilité isentropique $\chi_s = \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial P} |_S$. Or :
 $\mu = \mu_0 + \frac{\partial \mu}{\partial t}$ donne au premier ordre $\mu_1 = \mu_0 \chi_s p_1$.

1.3 Équations de propagation

D'Alembert pour v et p .

Célérité $c = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \chi_s}}$.

1.4 Célérité des ondes sonores

c est d'autant plus grande qu'un milieu est moins dense et moins compressible.

Mesure de la vitesse du son

Dans un gaz parfait

Loi de Laplace : $P\mu^{-\gamma}$. On différentie la log : $\frac{dP}{P} = \gamma \frac{d\mu}{\mu}$. Loi des GPs : $\frac{P}{\mu} = \frac{RT}{M}$. Donne $c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$.
 $M = 29g/mol$ et $T = 300K$.

Expérience Faire la mesure dans l'air.

Expliquer le principe [Bellier].

Comparer la valeur dans l'air avec la théorie. Comparer la valeur dans l'eau avec celle de l'air. Donner des ordg.

Interprétation microscopique

Expliquer avec les mains les facteurs influant sur la célérité : densité du milieu, température, pression.

<https://www.youtube.com/watch?v=Nkved7UcgqY>

2 Ondes acoustiques planes progressives

On utilise OPPH. Bien revoir cette histoire de base.

2.1 Couplage entre v et p

En notation complexe. $\mathbf{v} \propto \mathbf{k}$: Ondes longitudinales. $p_1 = \mu_0 c v_1$: les champs de pression et de vitesse proportionnels et vibrent en phase.

2.2 Aspects énergétiques

[Tec&Doc]

. Moyenne du vecteur densité. ODG et justification de l'approximation acoustique. Intensité sonore. Échelle des décibel.

2.3 Vecteur densité de flux

$$\Pi = p_1 \mathbf{v}_1.$$

2.4 Équation énergétique locale

Densité d'énergie : $e = \frac{1}{2} \mu_0 v_1^2 + \frac{1}{2} \chi_s p_1^2$.

Pour une OPP. Discuter les odg et la validité de l'approximation acoustique.

Intensité sonore Oreille = détecteur logarithmique. $I = 10 \log \frac{\langle \Pi \rangle}{\langle \Pi_0 \rangle}$ (en dB). odg. Discuter les min et max pour I et P.

3 Réflexion et transmission d'une OPP

Probablement ambitieux Je confirme : impossible

3.1 Impédance acoustique

L'impédance acoustique est une quantité qui va permettre de caractériser la transmission et la réflexion des ondes acoustiques à travers une surface.

Adaptation d'impédance dans l'oreille. Échographie on met du gel.

3.2 Conditions aux limites

3.3 Coefficients de transmission et réflexion

Conclusion

- Validité des approximations (Lire Tec&Doc à la fin).
- Applications : Mesure des débits sanguins par effet Doppler, cavité sonore, isolation (cf. Épreuve 1998)
- Dans les solides : Dans les solides, il n'existe pas seulement des ondes acoustiques longitudinales (dites ondes « P » en sismologie, pour Primaires car elles voyagent plus vite que les autres), mais aussi des ondes de cisaillement (S pour secondaires ou pour Shear).

Description de l'expérience

Bellier et al.

Expérience

Matériel

- Diapason + truc pour frapper
- Banc optique
- Récepteur et émetteur + support sur le banc
- Câbles + T
- GBF
- Oscilloscope
- Éventuellement résistance $R = 4k\Omega$ + multimètre
- Chronomètre

Protocole

- ▷ Faire le calcul (Bellier)
- ▷ Faire le montage : banc optique, émetteur sur GBF, GBF sur oscillo X, récepteur sur oscillo Y.
- ▷ En mode XY : voir quand les deux sont en phase, noter la première position. Déplacer de 10 périodes : noter x_10 quand il sont à nouveau en phase.
- ▷ $\Delta x = 10\lambda$ et $c = \frac{\lambda}{T}$.

Aspect quantitatif : Mesure de la vitesse du son dans l'air.

15

Propagation guidée des ondes

Niveau : L3

Prérequis :

- Équations de Maxwell
- Relations de continuité avec un conducteur parfait
- Notation complexe

Bibliographie :

- Tec&Doc MP-MP*, S. Olivier, Gié, Sarmant
- Électromagnétisme 2, 2ème année MP-PC. Faroux et Renault. J'intègre, DUNOD. 1998
- Ondes 2ème année PC-MP-PSI-PT. Classe prépa, Nathan. Hulot et Venturi.
- Ondes 2ème année MP-PC-PSI-PT. H-prépa, Hachette. Brébec.
- Dictionnaire de physique. Taillet.
- Exo sur mode TE_{nm} : Tec&Doc Exercices et problèmes d'EM 2 (2ème année). Sarmant **OU** https://fr.wikiversity.org/wiki/Ondes_%C3%A9lectromagn%C3%A9tiques_guid%C3%A9es/Guide_rectangulaire_%C3%89tude_des_modes_TEMn
- https://www.etienne-thibierge.fr/agreg/ondes_poly_2015.pdf#page=69&zoom=100,60,668

Introduction

Manip' qualitative Lampe et fibre optique.

Inconvénient de la perte d'énergie pour une propagation libre, intérêt du guidage.

Définition

Éventuellement sur slide

[Dico, FR] Déf., caractéristique. Type dépend de la gamme de fréquence.

On va s'intéresser dans la suite aux ondes EM

1 Propagation dans un guide d'onde à section rectangulaire

[Tec&Doc, FR]

1.1 Position du problème

Schéma. Hypothèses.

1.2 Le champ électrique

Structure de l'onde

[Nathan]

Progressive, monochromatique, transverse (TE). Attention : pas plane.

N.B : Dire qu'il y a TM.

N.B. 2 : Mode TEM pas possible dans guide creux \Rightarrow câble coaxial.

Équation de propagation

MG. D'Alembert. Conditions limites.

Expliquer les étapes.

Structures de champ admissibles

Quantification des modes. Interprétation physique.

Remarque importante

Discuter de la double quantification TE_{nm} . On se restreint aux modes TE_{n0} . Parler du mode dominant (fondamental).

N.B. : B s'obtient avec MF.

2 Étude des modes TE_{n0}

2.1 Relation de dispersion

Passe-haute, fréquence de coupure.

Vitesses de groupe et de phase

$v_\phi > c$ mais ok. $v_g < c$. On verra son sens physique.

2.2 Aspects énergétiques

La vitesse de propagation de l'énergie le long du guide s'identifie à la vitesse de groupe.

3 Câble coaxial

Facultatif : si vraiment il reste du temps

[H-prépa Ondes]

- Impossibilité du mode TEM dans un seul conducteur
- Nécessité de deux conducteurs : exemple du câble coaxial
- Relation de dispersion
- Comparaison avec une OPDM

Conclusion

Le concept de guide d'onde ne se limite pas aux ondes EM

Manip' qualitative Ondes acoustique avec et sans guidage.

Applications Radars, récepteurs en radioastronomie, fibre optique, endoscopes

Description de l'expérience

TP Ondes II + notice N 311

Expérience

Matériel

- Banc hyperfréquence (diode Gunn - isolateur - modulateur - fréquencemètre - atténuateur - ligne de mesure - court circuit variable) + les différents support, vis, etc.

Protocole

- ▷ Faire le montage de la notice p.8. + poly TP. **N.B.** l'atténuateur ne sert à rien.
- ▷ Brancher la Gunn -12/0 V (**ne pas relier le +12V!**) et le modulateur (même si celui-ci n'est pas utilisé dans ce TP) au boîtier d'alimentation.
- ▷ Brancher le fréquencemètre vers l'oscilloscope (mettre l'échelle adéquate pour observer un signal de quelques dizaines de millivolts d'amplitude).
- ▷ **Mesure de f** : On tourne la molette du fréquencemètre jusqu'à observer un max sur l'oscillo. **Important : les chiffres ne tournent pas bien, faut lire les chiffres d'en bas pour avoir la bonne valeur de f . Bref jouer dessus pour voir où on était avant et comment on avance.**
- ▷ Dérégler le fréquencemètre pour maximiser la puissance transmise au guide d'onde.
- ▷ **Mesure de la longueur d'onde** : Mode défilement sur l'oscillo. La distance entre deux minima consécutifs est $\frac{\lambda_g}{2}$.
- ▷ La dimension intérieure du guide est donnée par $a = 22.860 \pm 0.046mm$.

Aspect quantitatif : Mesure de la relation de dispersion $f = c\sqrt{(\frac{1}{\lambda_g})^2 + (\frac{1}{2a})^2}$. Tracer $f^2(\frac{1}{\lambda_g^2})$. En déduire c via le coefficient directeur et a via l'ordonnée à l'origine.

16

Microscopies optiques.

Niveau :

Prérequis :

- Optique géométrique
- Théorie de la diffraction (critère de Rayleigh, transformée de Fourier, etc.)

Bibliographie :

- Optique : Une approche expérimentale et pratique. Houard.
- La microscopie optique moderne. G. Wastiaux. Tec&Doc
- Optique : fondements et applications. Péréz.
- Optique physique. Taillet.
- Optique expérimentale. Sextant.
- Dictionnaire de physique. Taillet, Villain, Febvre.
- Images <https://www.nikonsmallworld.com/>
- Vidéos : <https://toutestquantique.fr/microscopes/>
- Epreuve agrégation standard 2015 : <https://nc.agregation-physique.org/index.php/s/XzZWHcEfQjWwD8f?path=%2F2015>
- Bonus animation : <https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/optiqueGeo/instruments/microscope.php>

Notes agrégat

- 2017 : L'intérêt des notions introduites doit être souligné.
- 2016 : Une technique récente de microscopie optique à haute résolution doit être présentée.

Introduction

Montrer des images de choses zoomés par le microscope qui sera traité à la fin. Dire que si on en est arrivés, là, c'est grâce aux développements en microscopie. Mais avant de présenter le microscope qui permet ça, commençons par les bases.

1 Microscope de base

[Houard] Historique (slide ou selon le temps juste pour les questions). Jansen père et fils (1590). Galilée (1610). Hooke (1665) : microscope à 3 lentilles composés mais d'une qualité optique inférieure à celui de Leeuwenhoek (1632-1723) : lentille simple mais grande résolution pour l'époque (de l'ordre du micron), l'utilisation d'une lentille simple limitant les aberrations, contrairement à Hooke. Puis Bancks (1830) : microscope simple encore mais grand pouvoir de résolution (Darwin et Brown étaient ses clients!). Réputé jusqu'en 1848, puis comment à disparaître au profit du microscope composé dont les performances deviennent comparables lorsque le problème des aberrations est enfin résolu.

Présentation d'un microscope optique élémentaire à champ large [Epreuve 2015, Houard, p. 158]
Montrer un vrai microscope. Nommer ses différents composants (oculaire, objectif, statif, source, etc.).

1.1 Schéma optique simplifié

Schéma optique avec deux lentilles. Constructions géométriques d'images et de rayons.

$$AB \xrightarrow{L_1} A_1B_1 \xrightarrow{L_2} A'B'. \quad (1.1)$$

Image intermédiaire A_1B_1 agrandie et inversée. Pour obtenir un grandissement important et un encombrement réduit, on utilise L_1 de courte focale (qqs mm à qq cm). Pour que l'image intermédiaire soit réelle, il faut placer l'objet avant le foyer objet de l'objectif (s'en convaincre avec la loi de conjugaison de Descartes. Et juste très près juste avant pour optimiser le grandissement).

L'oculaire agit comme une loupe et donne de l'image intermédiaire réelle une image finale virtuelle. Lors d'une utilisation normale, A_1B_1 est dans le plan focal objet de l'oculaire pour une observation sans accommodation ($A'B'$ est rejetée à l'infini).

Expérience qualitative [Houard, p. 166] Présenter le dispositif expérimental à deux lentilles. Voir en effet que l'image intermédiaire est renversée, et que l'image finale sur l'œil sera droite et agrandie (renverse l'image virtuelle renversée de l'oculaire).

N.B. C'est une microscopie à champ clair.

1.2 Grossissement

[Houard p. 156, TD Clément Optique géométrique] Les performances du microscope sont caractérisés par deux grandeurs.

- Son grossissement
- Sa puissance (ne pas en parler), cf. Houard.

Puisque le microscope forme d'un objet à distance finie une image à l'infini, on cherche à calculer le grossissement commercial $G = \frac{\alpha'}{\alpha}$ avec α l'angle sous lequel l'œil voit AB à $d_m = 25$ cm (punctum proximum) et α' l'angle sous lequel est vue l'image dans l'oculaire du microscope. Montrer que $G_c = \gamma_{ob} G_{c,oc}$ avec $\gamma_{ob} = \frac{A_1B_1}{AB}$ et $G_{c,oc} = \frac{\alpha'}{\alpha_{oc}} = \frac{A_1B_1}{f'_2} \frac{d_m}{A_1B_1} = \frac{d_m}{f'_2}$.

N.B. Lien avec la puissance intrinsèque : $G_c = P d_m = \frac{\Delta d_m}{f'_1 f'_2}$ avec $\Delta = F'_{ob} F_{oc}$ l'intervalle optique en général égal à 16cm.

Expérience mesurer le grossissement commercial du microscope [TP + Sextant p.54].

1.3 Aberrations liées aux lentilles

[Houard, p. 125] Aberrations chromatiques et géométriques.

Corrections aux aux objectifs de microscope [Houard, p. 158] et aux oculaires [p. 161] (ne pas forcément en parler).

A ce stade, on ne voit a priori pas de limite à avoir de très grand grossissement. De plus, lors la question de savoir si on est capable de voir nette toute l'épaisseur de l'objet se pose. On verra que ce n'est pas le cas, et qu'on aura une limite sur la résolution. Ce qui a nécessité le développement de nouvelles microscopies optiques dont la confocale qui fera l'objet de la seconde partie.

2 Limite de résolution et microscopie confocale

[Houard] L'objectif est la pièce maîtresse du microscope. Il doit fournir une image intermédiaire agrandie de très bonne qualité. Caractéristiques : grandissement, ouverture numérique, objectif à immersion ou non, degré de correction des aberrations chromatiques. La caractéristique la plus importante d'un objectif est elle qui conditionne le pouvoir de résolution du microscope : c'est l'ouverture numérique. Dans la suite nous allons introduire ces deux notions.

2.1 Ouverture numérique

[Taillet] $\omega_0 = n \sin u$, où u est l'angle que fait dans le milieu d'indice n le rayon le plus incliné qui traverse l'objectif.

N.B. Abbe montra que le pouvoir de résolution spatiale varie comme l'inverse de l'ouverture numérique.

2.2 Limite de résolution

c'est la distance minimale devant exister entre deux points A et B de la lamelle échantillon pour que leurs images à travers le microscope soient séparées.

Cette distance AB_{\min} est imposée par le phénomène de diffraction. En effet, la figure de diffraction d'un trou circulaire donne la tache d'Airy. La tache centrale est limitée par le premier minimum nul d'angle vérifiant $\sin \theta \simeq \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D_0}$ où $D_0 = 2R$ est le diamètre du trou. Le diamètre angulaire de la tache d'Airy vaut donc $\Delta\theta = 2\theta = 1.22 \frac{\lambda}{R_0}$ et son rayon $R = \frac{\Delta\theta}{2} L = 0.61 \frac{\lambda L}{R_0}$ avec L la distance d'observation (ou f' si l'observation est faite dans le plan focal image d'une lentille).

Critère de Rayleigh Deux objets ponctuels de même luminosité sont tout juste résolus si le maximum de la figure de diffraction correspond au premier minimum de la figure de diffraction de l'autre.

Pour le microscope [Houard, footnote p. 160] La tache d'airry intermédiaire en A_1 a un rayon $R_1 = \frac{0.61\lambda L}{R_0} = \frac{0.61\lambda}{u_1} \simeq \frac{0.61\lambda_0}{n_1 \sin u_1}$. En appliquant la relation d'Abbe (cf. TD Optique géométrique) : $nAB \sin u = n_1 A_1 B_1 \sin u_1$, la condition $A_1 B_1 \min = R_1$ donne $AB_{\min} = \frac{n_1 \sin u_1 A_1 B_1 \min}{n \sin u} = \frac{n_1 \sin u_1 R_1}{n \sin u}$. Finalement

$$AB_{\min} = \frac{0.61\lambda_0}{n \sin u} = \frac{0.61\lambda_0}{\omega_0}. \quad (2.1)$$

[Houard] Plus le demi-angle d'ouverture u du rayon incident est grand, meilleure est la résolution. La limite de résolution de l'objectif conditionne celle du microscope. En effet, si l'image intermédiaire n'est pas résolue, l'image finale agrandie par l'oculaire ne le sera pas non plus.

ODG : $\lambda = 400 \text{ nm}$, $n_{liq} = 1.5$ (objectif à immersion), $\omega_0 = 1.25$, on obtient $AB_{\min} = 0.2 \mu\text{m}$.

N.B. Le pouvoir de résolution de l'œil est d'environ une minute d'arc.

On vient qu'on est limité sur les détails d'un objet. Mais qu'en est-il de la résolution d'un objet le long de l'axe optique.

2.3 Profondeur de champ

[Wiki] En microscopie optique à champ large, pour qu'une image soit nette, il faut que l'objet soit dans le plan focal du système optique. Lorsqu'un objet est épais, présente un relief important, ou bien lorsqu'il est incliné par rapport à l'objectif, seule une partie de l'objet est nette dans l'image.

[JF] Voir [44], p. 157 et [77], p. 70. On reste qualitatif en exprimant juste le lien entre profondeur de champ et ouverture numérique.

[Pérez, p. 120] Lorsque l'ouverture numérique augmente, la profondeur de champ diminue. ODG : $1\mu\text{m} \rightarrow$ le microscope permet de repérer avec une très grande précision la position de l'objet sur l'axe optique.

Transition [Wiki] Plus le grossissement est élevé, plus cette profondeur est faible, ce qui empêche d'avoir une image nette sur la totalité d'un objet un peu étendu. Ceci est particulièrement ennuyeux pour les objets allongés comme les nerfs ; ils sont donc flous sur une partie de leur trajet quelle que soit l'habileté du préparateur. C'est également un problème pour les surfaces rugueuses ou gauches, comme des faciès de rupture.

2.4 Microscope confocal

Le principe du microscope confocal a été décrit par Marvin Minsky en 1953, mais ce n'est que dans la fin des années 1980 que des modèles commerciaux sont apparus, rendant cette technique accessible à de nombreux laboratoires. La microscopie confocale est très utilisée aujourd'hui en biologie ainsi qu'en sciences des matériaux.

[Wastiaux p. 254] Il agit comme un « couteau optique » et permet d'examiner l'intérieur des structures épaisses et de « découper » l'échantillon dans plusieurs directions.

Principe

Vidéo : https://fr.wikipedia.org/wiki/Microscope_confocal

[JF] Reproduction point par point d'un fin diaphragme dans le plan de l'objet. Pour obtenir une image totale, le point lumineux balaie la surface de l'objet au moyen de miroirs. Seules les informations du plan focal parviennent au détecteur : microscope confocal.

[Wiki] Microscopie qui a la propriété de réaliser des images de très faible profondeur de champ (environ 400 nm) appelées « sections optiques ». En positionnant le plan focal de l'objectif à différents niveaux de profondeur dans l'échantillon, il est possible de réaliser des séries d'images à partir desquelles on peut obtenir une représentation tridimensionnelle de l'objet. L'objet n'est donc pas directement observé par l'utilisateur ; celui-ci voit une image recomposée par ordinateur. Le microscope confocal fonctionne en lumière réfléchie ou en fluorescence. La plupart du temps, on utilise un laser comme source de lumière.

Avantages

[Wastiaux, p. 256]

[Wiki] La résolution est légèrement meilleure, mais le point le plus important est qu'il permet de former une image de coupes transversales sans être perturbé par la lumière hors du plan focal. Il donne donc une image très nette des objets en trois dimensions. Le microscope confocal est souvent utilisé en conjonction avec la microscopie à fluorescence.

Images <https://www.nikonsmallworld.com/techniques/confocal> Confocal imaging involves scanning the specimen to create computer-generated optical sections down to 250 nm thickness using visible light. These optical sections may be stacked to provide a 3-D digital reconstruction of the specimen.

Intérêt supplémentaire de la fluorescence

Images <https://www.nikonsmallworld.com/techniques/fluorescence> Fluorescence imaging uses high intensity illumination to excite fluorescent molecules in the sample. When a molecule absorbs photons, electrons are excited to a higher energy level. As electrons ‘relax’ back to the ground-state, vibrational energy is lost and, as a result, the emission spectrum is shifted to longer wavelengths.

[JF] Ça marche super bien en fluorescence car la lumière diffusée est pratiquement éliminée. Vidéo de la mitose d’une cellule : plus de destruction de l’échantillon, suivre l’évolution et en plus avec chaque couleur on sait qui est qui.

Transition Et si ce qu’on veut regarder est transparent, sans effet sur l’intensité lumineuse ? Il faut alors travailler avec le seul élément optique modifié à la traversée de l’échantillon par l’onde lumineuse : la phase !

3 Microscope à contraste de phase

[Taillet, p. 153. Hecht, p. 634. [wiki](#)]

Le contraste de phase est une technique largement utilisée qui permet de mettre en valeur les différences d’indices de réfraction comme différence de contraste. Elle a été développée par le physicien hollandais Frederik Zernike dans les années 1930 (il reçut pour cela le prix Nobel en 1953). Le noyau d’une cellule par exemple apparaîtra sombre dans le cytoplasme environnant. Le contraste est excellent, néanmoins cette technique ne peut être utilisée avec les objets épais.

Principe mathématique

Le microscope à contraste de phase est un microscope qui exploite les changements de phase d’une onde lumineuse traversant un échantillon.

Vidéo : https://fr.wikipedia.org/wiki/Microscope_%C3%A0_contraste_de_phase

3.1 Intérêt

Images <https://www.nikonsmallworld.com/techniques/phase-contrast>

[nikon] The technique is applicable to many transparent subjects, such as living cells in culture, micro-organisms, thin tissue slices, lithographic patterns, fibres, latex dispersions, glass fragments, and subcellular particles (including nuclei and other organelles) where the technique reveals structure that is not visible in brightfield imaging. An advantage of phase contrast microscopy is that living cells can be imaged in detail without the need for staining or use of fluorophores.

[TD] Les microscopes à contraste de phase sont utilisés dans les laboratoires de biologie car ils permettent d’étudier les objets vivants sans les colorer et donc sans les tuer.

Conclusion

- Citer d’autres microscopes optiques :

- Microscopie en champ sombre
- Microscope à contraste de phase
- Microscopie à fluorescence (agreg 2015)
- Microscopie confocale
- Microscopies à champ proche (agreg 1998)

- Ouvrir sur d’autres types de microscopies (ex : effet tunnel, électronique. cf. agreg 2015).

[Houar] Dans un microscopique optique, il n’est pas possible de descendre en dessous de $0.2\mu\text{m}$ et le grossissement max est de l’ordre de 1000. C’est suffisant pour observer des cellules ou des bactéries, mais insuffisant

pour observer des virus. Cependant, le pouvoir de résolution étant proportionnel à λ , on peut espérer l'abaisser suffisamment en utilisant un flux de particules possédant une longueur d'onde nettement inférieure à celle des photons : c'est le principe du microscope électronique.

Description de l'expérience

TP Instruments d'optique

Expérience

Matériel

- Microscope (ex : $\gamma_{obj} = 4$, $G_{c,oc} = 10$)
- Support élévateur
- Mire graduée en dixièmes de millimètre
- Lampe quartz-iode + condenseur de courte focale (ex : 8cm)
- Filtre antithermique (déjà installé au dessous de la platine porte-objet, sinon entre le condenseur et l'objet)
- Lentille de grande focale (ex : 1 à 2 m, sinon improviser selon l'espace)
- Écran dans le plan focal
- Grande règle
- Chronomètre
- Pour qualitatif [Houard, p. 166]
 - Lentilles ($f'_{ob} = 10cm$, $f'_{oc} = 20cm$, $f'_{proj} = 15cm$)
 - Objet : grille + F
 - Lampe QI
 - Grande règle
 - Écran
 - Support de lentille vide (pour le placer au plan de l'image intermédiaire issue de l'objectif)

Protocole

- ▷ Placer la mire sur le microscope
- ▷ Faire le montage : lampe+condenseur - objet (mire) - microscope (objectif + oculaire) - lentille - écran.
- ▷ Mesurer $\alpha' = \frac{A'B'}{f'}$. En déduire $G_c = \frac{\alpha'}{\alpha}$ avec $\alpha = \frac{AB}{d_m}$ ($d_m = \text{pronctum proximum}$). **N.B** Prendre plusieurs graduations pour diminuer les incertitudes.

Aspect quantitatif : Mesure du grossissement commercial du microscope $G_c = \frac{A'B'}{f'} \frac{d_m}{AB}$ via la mesure de $A'B'$. Comparer à $G_c^{fab} = \gamma_{obj} G_{c,oc}$.

17

Interférences à deux ondes en optique

Niveau : 2ème année CPGE

Prérequis :

- Modèle scalaire de l'onde
- Chemin optique, différence de marche
- Intensité lumineuse
- Formules trigonométriques

Bibliographie :

- Physique Spé MP-MP*. Olivier, Gié, Sarmant. Tec & Doc
- Optique expérimentale. Sextant.
- Optique : Une approche expérimentale et pratique. Houard.
- Tout-en-un, MP. Sanz. Dunod.
- Eugene HECHT. Optique. Pearson, 2005

Introduction

Manip' introductive :

si on superpose deux lasers, il ne se passe rien. Si on les fait passer à travers un dispositif qui élargit le faisceau + une fente source + une bifente : on voit une figure d'interférence.

1 Interférences à deux ondes

Définition : phénomène ondulatoire qui résulte d'une interaction entre deux ondes (lumineuses) qui produit une intensité totale qui diffère de la somme des intensités individuelles.

1.1 Superposition de deux ondes

On considère deux sources ponctuelles S_1 et S_2 et des amplitudes vibratoires $a_i(M, t) = A_i \cos\left(\omega_i t - \phi_{S_i} - \frac{2\pi[S_i M]}{\lambda_{0i}}\right)$. L'amplitude totale est : $a(M, t) = a_1(M, t) + a_2(M, t)$. L'intensité est : $I(M, t) = \langle a^2(M, t) \rangle$.

En développant, on obtient :

$$I = I_1 + I_2 + I_{1,2} \quad (1.1)$$

avec $I_{1,2} = 2A_1 A_2 \cos(\omega_1 t - \phi_1(M)) \cos(\omega_2 t - \phi_2(M))$

1.2 Conditions d'interférence, notion de cohérence

- $I_{1,2} \neq 0$, dans ce cas on dit que les ondes sont cohérentes,
- si $\omega_1 \neq \omega_2$, $I_{1,2} = 0$

Condition 1 : deux ondes de pulsations différentes sont incohérentes.

Présentation du modèle du train d'onde : paquet d'onde séparés par un temps τ . Comme ϕ_{S1} et ϕ_{S2} varient aléatoirement, on obtient $I_{1,2}$ non nulles sur le détecteur si :

Condition 2 : Il faut que les deux ondes soient issus du même train d'onde.

On obtient alors la formule de Fresnel :

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi(M) \quad (1.2)$$

où $\Delta\phi(M) = \frac{2\pi([S_2 M] - [S_1 M])}{\lambda_0}$.

2 Exemple d'interféromètre : les trous d'Young

Cf photo.

$$I = 2I_0 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi ax}{\lambda D} \right) \right] \quad (2.1)$$

Succesion de franges brillantes et de franges sombres. La distance entre deux franges brillantes est appelée **interfrange** notée i qui vaut ici : $i = \frac{\lambda_0 D}{a}$.

Expérience

Mesure de l'interfrange de la figure d'interférences pour en déduire a . On mesure $a = 0.16 \pm 0.04 \text{ mm}$ à comparer avec la valeur $a_{\text{fabriquant}} = 0.2 \text{ mm}$.

3 Notion de cohérence spatiale

Effet de la largeur de la source en reprenant le problème avec deux sources séparées par une distance b . On obtient à l'aide des formules obtenues dans la partie précédente :

$$I_{\text{tot}} = 4I_0 \left[1 + \cos \left(\frac{\pi ab}{\lambda D} \right) \cos \left(\frac{2\pi ax}{\lambda D} + \frac{2\pi ab}{\lambda D} \right) \right] \quad (3.1)$$

ODG

- Lampe spectrale basse pression $l_c \simeq 1 \text{ cm}$.
- Source de lumière blanche $l_c = c\tau_c = \frac{c}{\Delta\nu} \simeq 1 \mu\text{m}$.
- Laser He-Ne du labo 30 cm . Peut atteindre le km !
- Lire TD Clément.

Conclusion

Ouverture sur les dispositifs à division du front d'onde et division d'amplitude.

Description de l'expérience

Expérience

Matériel

- Deux lasers.
- Élargisseur (lentille de courte focale (ex : $f' = 5\text{cm}$ + porte-lentille + support élévateur).
- Grande règle.
- Fente source (facultatif?).
- Bifente.
- Lentille ($f' \sim 10\text{cm}$) (facultatif?).
- Pied à coulisse.

Protocole

- ▷ § 8.2.1 du Houard (p. 197)

Aspect quantitatif : Mesure de l'espacement entre les deux fentes à partir de la mesure de l'interfrange.

$$i = \frac{\lambda D}{a}.$$

18

Interférométrie à division d'amplitude

Niveau : L2

Prérequis :

- Optique Géométrique et trigonométrie
- Interférences à deux ondes
- Interférences à division du front d'onde
- Cohérence temporelle et spatiale

Bibliographie :

- Optique ondulatoire, Pascal Legagneux-Piquemal, PC, MP, PSI, PT. Nathan
- Physique Spé MP-MP*. Olivier, Gié, Sarmant, More. Tec & Doc
- Hprépa bleu, Optique ondulatoire 2e année : MP-PC-PSI-PT. Hachette (2004). p. 74. Brébec et al.
Attention il y a une erreur de signe dans le théorème de localisation
- Houard. Optique : Une approche expérimentale et pratique.
- Optique physique, Mauras, Presse Universitaire de France
- Optique : fondements et applications. Pérez.
- Étienne Thibierge http://www.etienne-thibierge.fr/agreg/cplt_localisation.pdf
- Femto <https://femto-physique.fr/optique/coherence.php>
- TD de C. Sayrin <http://www.lkb.upmc.fr/cqed/teaching/teachingsayrin/>.
- Optique expérimentale. Sextant.
- Tout-en-un, MP. Sanz. Dunod.

Notes agrégat

- 2017 : Le candidat doit réfléchir aux conséquences du mode d'éclairage de l'interféromètre (source étendue, faisceau parallèle ou non...). Il est judicieux de ne pas se limiter à l'exemple de l'interféromètre de Michelson.
- 2016 : La distinction entre divisions du front d'onde et d'amplitude doit être précise. Le jury rappelle que l'utilisation d'une lame semi-réfléchissante ne conduit pas nécessairement à une division d'amplitude.
- 2015 : Les notions de cohérence doivent être présentées.
- 2014 : Un interféromètre comportant une lame séparatrice n'est pas obligatoirement utilisé en diviseur d'amplitude. La notion de cohérence et ses limites doivent être discutées.

Introduction

[H-prépa, p. 74]

[JF] Les dispositifs de division du front d'onde présentent l'inconvénient d'être sensible à la perte de cohérence spatiale et contraignent les utilisateurs à limiter la taille de la source, donc irrémédiablement l'intensité lumineuse envoyée dans le dispositif.

1 Intérêt de la division d'amplitude

1.1 Retour sur les fentes d'Young

Manip' introductive Dans le dispositif des fentes d'Young, élargir la source et observer la perte de contraste due à la perte de cohérence spatiale.

[JF] Source ponctuelle implique interférences bien contrastées, partout dans l'espace, mais pour une source étendue, la division par front d'onde n'est pas optimale : la division d'amplitude est nécessaire.

Conséquences de l'élargissement de la source

[H-prépa, p.77] L'éclairement augmente, le contraste diminue. Critère de visibilité : si la différence de marche varie peu à l'échelle de la longueur d'onde lorsque S balaie l'ensemble de la source étendue, le contraste de franges reste convenable.

Transition On peut formaliser ce critère : c'est l'objet du théorème de localisation qui cherche à déterminer les points pour lesquels $\delta(S, M)$ dépendraient suffisamment peu de S .

1.2 Théorème de localisation

http://www.etienne-thibierge.fr/agreg/cplt_localisation.pdf

[Thibierge] Considérons un interféromètre tout à fait quelconque, éclairé par une source ponctuelle S , comme représenté figure 1. Les interférences sont observées en un point M de l'espace, et on note \vec{u}_1 et \vec{u}_2 les directions d'entrée dans l'interféromètre des deux rayons qui interfèrent en M . La différence de marche entre les deux voies s'écrit $\delta(S, M) = (SM)_2 - (SM)_1 = (SA_2) - (SA_1) - L_2 - L_1$ (stigmatisme).

Rappel

- Si tout rayon issu d'un point A arrive, après avoir traversé le système optique, en un point A' , on dit que A' est l'image de A , et le système optique est rigoureusement stigmatique vis à vis des points A et A' .
- Condition de stigmatisme : Un système optique est stigmatique vis à vis du couple objet-image (A, A') si, et seulement si le chemin optique $\mathcal{L}(AA')$ est constant pour tous les rayons lumineux joignant A à A' à travers le système optique.

Condition de non brouillage

[Thibierge] On cherche à établir un critère de non-brouillage des interférences sous l'effet de l'élargissement de la source. [Mauras, p. 159] Non-brouillage si l'intensité en M due à S ne varie pas quand S se déplace en S' , donc pas de variation de chemin optique.

Propriété [TD I] De façon générale, si l'on considère un segment $[AB]$, de vecteur directeur unitaire \vec{u} , sa variation de longueur engendrée par un déplacement du point B du vecteur $d\vec{B}$ et un déplacement du point A du vecteur $d\vec{A}$ est donnée par

$$dAB = d(\vec{u} \cdot \vec{AB}) = \vec{u} \cdot d\vec{AB} + \vec{AB} \cdot d\vec{u} = \vec{u} \cdot (d\vec{B} - d\vec{A}) + AB\vec{u} \cdot d\vec{u} \quad (1.1)$$

Or $\vec{u} \cdot d\vec{u} = 0$:

$$dAB = \vec{u} \cdot (d\vec{B} - d\vec{A}). \quad (1.2)$$

[femto] Déplaçons légèrement la source de façon à l'amener en S' : $d\vec{S} = \vec{S}\vec{S}'$ Ceci implique une variation sur la distance [H-prépa] $d(SA) = \vec{u} \cdot \vec{S}\vec{A}$. Cette opération s'accompagne d'une variation de δ qui, si le déplacement est suffisamment faible, vaut à l'ordre 1 $d\delta = (\vec{u}_2 - \vec{u}_1) \cdot \vec{S}\vec{S}' = 0$.

[Thibierge] Ce résultat est général au sens où il vaut pour n'importe quel interféromètre, mais il est issu d'un développement limité au premier ordre en $[SS']/[SM]$. Il y a deux possibilités pour que le contraste des interférences soit préservé quand la source est élargie [Mauras] :

- Diviseurs de front d'onde $\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2$ impose $\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2 \perp \vec{S}\vec{S}'$
- Diviseurs d'amplitude $\mathbf{u}_1 = \mathbf{u}_2$

[Femto] La première configuration impose une géométrie particulière à la source. Par exemple, dans l'expérience des trous d'Young, remplacer la source ponctuelle par une fente source horizontale quand les trous sont verticaux (et vice versa) est bénéfique puisque la condition est vérifiée : la luminosité du motif d'interférence est renforcée sans perte de contraste.

La deuxième configuration ne porte pas sur la source mais sur l'interféromètre. En effet, la condition $\mathbf{u}_1 = \mathbf{u}_2$ n'est remplie que dans les interféromètres à division d'amplitude où un rayon incident unique est divisé en deux. A priori, tous les points M de l'espace ne permettent pas de vérifier ce critère : cette condition à un coût : le lieu des points M où interfèrent ces rayons est en général une surface précise ; on dit que les interférences sont localisées. Les interférences sont localisées au voisinage des points M qui le permettent.

Énoncé du théorème

[Femto] Les interféromètres à division d'amplitude donnent lieu à un phénomène d'interférences contrastées en présence d'une source étendue. Toutefois, l'extension de la source produit un phénomène de localisation des interférences. La surface de localisation est le lieu des intersections des rayons émergeant issus du même rayon incident partant de S.

N.B [Thibierge] Remarquer la modération du théorème : on parle de « pouvoir donner lieu ». Le critère de non-brouillage est en effet un résultat de premier ordre, mais rien ne dit que les ordres suivants sont toujours négligeables. Heureusement, c'est toujours le cas en pratique car on utilise des sources pas trop larges qui éclairent les interféromètres avec des incidences pas trop grandes.

Intérêt

Avec la division d'amplitude on peut augmenter la largeur de la source sans réduire la cohérence, le prix à payer étant la localisation.

2 Interféromètre de Michelson

[Houard, p. 224]

2.1 Présentation du dispositif

Schéma (slide). Présenter le dispositif réel. Rôle de la séparatrice. Rôle de la compensatrice. Schéma de principe.

2.2 Configuration en lame d'air

[Te&Doc, Sanz, H-prépa]

2.3 Présentation

Définition. Construire le schéma équivalent en suivant Tec&Doc, p. 96.

2.4 Franges d'interférence

Illustrer avec les manip' à chaque fois que c'est pertinent

Localisation à l'infini pour une source étendue. **Interprétation qualitative de la localisation** [Tec&Doc + TD II + H-prépa]. Franges d'égales inclinaison, différence de marche. Ordre d'interférence. Rayon des anneaux.

Calcul de la différence de marche [TD II] + adapter [Pérez, p. 321] en réflexion :

$$\begin{aligned}\delta &= n([ABC] - [AD]) \\ [ABC] &= 2AB = 2\frac{e}{\cos\theta} \\ [AD] &= AC \sin i = nAC \sin\theta = 2ne \tan\theta \sin\theta \\ \delta &= 2ne \left(\frac{1}{\cos\theta} - \tan\theta \sin\theta \right) = 2ne \cos\theta\end{aligned}$$

N.B. [Piquemal] Pour l'interféromètre de Michelson en source étendue, la surface de localisation est l'ensemble des points d'intersection des deux émergents correspondant au même incident primitif.

Application : Mesure du doublet du sodium

[Tec&Doc]

Faire les calculs proprement : insister sur l'incohérence (lumière non monochromatique) et comment ça mène vers le brouillage.

Expérience L'écart Δe entre deux antioïncidences est donné par :

$$\Delta e = \frac{\bar{\lambda}}{2\Delta\lambda^2} \quad (2.1)$$

avec $\Delta\lambda = |\lambda_2 - \lambda_1|$ et $\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$.

2.5 Configuration en coin d'air

Présentation

Définition. Schéma équivalent.

2.6 Franges d'interférence

Les montrer expérimentalement

Localisation au voisinage des miroirs pour une source infini. Différence de marche. Franges d'égale épaisseur.

3 Interféromètre de Fabry-Perrot

Si le temps, mais peu probable. Lire le Houard pour les questions.

C'est un interféromètre à ondes multiples constitué de deux lames de verre à faces parallèles.

Conclusion

Selon la maîtrise :

- Il y a d'autres interféromètre à division d'amplitude : Fabry-Perrot (ondes multiples), Mach-Zehnder et Sagnac, détecteur d'ondes gravitationnelles (Virgo - Michelson)
- Applications [Houard]

- lame d'air : métrologie, spectroscopie interférentielle
- Coin d'air : détection de défauts ou perturbation : contrôle polissage de miroirs, mesure de l'épaisseur d'une lame mince, indice de réfraction d'un gaz.
- Fabry-Perrot : cavité laser, traitement anti-reflet, filtre interférentiel, spectrométrie interférentielle en astronomie
- Mach-Zehnder et Sagnac : mesure de faibles vitesses angulaires

Description de l'expérience

TP Interférences

[Houard]

Expérience

Matériel

Manip' introductive

- Lampe à vapeur de sodium
- Bifente (Young)
- Fente source réglable
- Filtre interférentiel (jaune)
- Lentille $f'_1 = 15\text{cm}$
- Lentille $f'_2 =$
- Écran

Doublet du sodium

- Laser He-Ne
- Lentille de courte focale (ex : $f' = 5\text{mm}$)
- Porte lentille + support élévateur
- Lentille de grande focale (selon la distance à l'écran souhaitée)
- Michelson en lame d'air
- Lampe à vapeur de sodium
- Condenseur (lentille) de 70 mm
- Lentille convergente $f' = 15\text{cm}$
- Pied à coulisse
- Grande règle et/ou mètre
- Écran
- Chronomètre

Protocole

Manip' 1

- ▷ § 8.3.6 du Houard (p. 208)

Manip' 2

- ▷ § 8.5.5.b du Houard (p. 230)
- ▷ Régler le Michelson au laser en suivant les indications du TP interférences. Trouver la teinte plate
- ▷ Mettre la lampe à sodium et se placer en lame d'air en chariotant.
- ▷ Lecture sur le verrier :
 - On lit en haut. Ex : 25mm
 - On regarde les petits traits d'en bas. Si on voit le petit trait, c'est qu'on a dépassé 0.50. Ex : 25.50
 - Enfin, on regarde où coïncide la grande ligne avec le trait de la vis pour avoir la virgule. Ex : 43 donne $25.50 + 0.43 = 25.93$.
- ▷ Lire sur le verrier les positions successives entre deux antioïncidences et calculer Δe
- ▷ Voir sur la notice les valeurs attendues

Aspect quantitatif : Mesure du doublet du sodium : $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2\Delta e}$ avec $\lambda = 589 \text{ nm}$. J'ai trouvé en faisant la manip' avec la lampe de Montrouge $x_1 = 27.72 \text{ mm}$ et $x_2 = 27.43 \text{ mm}$.

19

Diffraction de Fraunhofer

Niveau : L3

Prérequis :

- Optique ondulatoire (amplitude, chemin optique, notation complexe, etc.)
- Interférences
- Transformées de Fourier
- Trigonométrie

Bibliographie :

- H-prépa bleu. Optique ondulatoire 2e année : MP-PC-PSI-PT. Brébec et al.
- Physique Spé MP. Tec&Doc. G.S.O.M.
- Optique ondulatoire, Pascal Legagneux-Piquemal, PC, MP, PSI, PT. Nathan
- Optique. Sylvain Houard. de boeck.
- Dictionnaire de physique, Taillet
- Sylvio Rossetti : https://perso.ens-lyon.fr/sylvio.rossetti/AGREG/LP/LP35_Diffraction%20de%20Fraunhofer/LP35_Diffraction_de_Fraunhofer.pdf
- Femto : <https://femto-physique.fr/optique/diffraction-de-fresnel.php>
- En bonus : Optique, Pérez.
- En bonus : Optique, Hecht.
- En bonus : TD de C. Sayrin <http://www.lkb.upmc.fr/cqed/teaching/teachingsayrin/>.

Notes agrégat

- 2017 : Les conditions de Fraunhofer et leurs conséquences doivent être présentées, ainsi que le lien entre les dimensions caractéristiques d'un objet diffractant et celles de sa figure de diffraction.
- Jusqu'en 2013, le titre était : Diffraction de Fraunhofer. Applications.
- 2014, 2013, 2012, 2011 : Les conditions de l'approximation de Fraunhofer doivent être clairement énoncées. Pour autant, elles ne constituent pas le coeur de la leçon.

Introduction

[H-prépa]

Expérience introductive Fermer progressivement une fente devant un laser.

[JF] Comme le faisceau est parallèle en sortie du laser, on obtient une tache de largeur a sur l'écran (ok optique géo). Quand on ferme la fente, a diminue : la tache sur l'écran s'élargit et on voit apparaître une tache centrale et des taches secondaires : DIFFRACTION. On est plus dans la limite de l'optique géométrique : on doit considérer l'aspect ondulatoire de la lumière. Avec quels principes expliquer ce phénomène ?

1 Phénomène de diffraction

1.1 Définition

Déf., critère, ordre de grandeur.

[Piquemal] Ce phénomène a lieu dans tous les domaines de la physique, pour toutes les ondes de longueur d'onde arrivant sur un objet dont l'échelle typique d de variations spatiales est du même ordre de grandeur. Si on veut explorer un cristal dont la maille est de l'ordre de quelques 0,1 nm, alors il faut disposer d'une onde de longueur d'onde λ c'est pourquoi on utilise des rayons X.

1.2 Principe d'Huygens-Fresnel

[Tec&Doc, H-prépa]

Énoncé

Surface diffractante plane. Faire le schéma avec les 3 repères. Amplitude complexe instantanée $a(M, t) = a_0(M)e^{i\omega t}$. On va s'intéresser à l'amplitude complexe tout court (on zappe le $e^{i\omega t}$).

[Clément] Chaque point M d'une surface Σ atteinte par la lumière peut être considérée comme une source secondaire émettant une onde sphérique. L'état vibratoire de cette source secondaire est proportionnel à celui de l'onde incidente en M et à l'élément de surface $d\Sigma$ entourant le point M .

Les vibrations issues des différentes sources secondaires interfèrent entre elles.

Discussion

[Tec&Doc, p. 139]

[Sylvio] En réalité, il n'y a pas de source secondaire, c'est un résultat mathématique qui dit que c'est comme s'il y avait des sources secondaires.

[Femto] <https://femto-physique.fr/optique/diffraction-de-fresnel.php>

Facteur de transmission

[H-prépa] Définir et donner des exemples.

[Houard, p. 31]

Expression mathématique du principe

[Tec&Doc, H-prépa]

Faire le schéma avec les 3 repères. L'amplitude issue de $P \in$ pupille au point M :

$$da_P(M) = K t(P) a_S(P) \frac{e^{-ikPM}}{PM} d\Sigma. \quad (1.1)$$

avec $a_S(P) = \frac{A_0}{SP} e^{-ik_0 SP}$ l'amplitude qu'aurait en P l'onde incidente en l'absence de diffraction. Finalement

$$a_P(M) = K A_0 \iint t(P) a_S(P) \frac{e^{-ikPM}}{PM} d\Sigma = K A_0 \iint t(P) \frac{e^{-ikSP}}{SP} \frac{e^{-ikPM}}{PM} d\Sigma \quad (1.2)$$

[TD, Hprépa]

En pratique Les dimensions transverses de l'expérience (taille de la pupille, zone d'observation) sont petites devant les dimensions longitudinales (distance objet-écran D et source-objet d) : $x, y \ll d, D$ (petite pupille), $X, Y \ll D$ (petits angles). On peut alors faire l'approximation $PM \simeq D$ dans la norme $\frac{a_S(P)}{PM}$: la norme ne varie significativement que si les variations de PM sont de l'ordre de D . En revanche, pour évaluer la phase $\varphi = kPM$, il faut tenir compte des variations de PM à l'échelle de la longueur d'onde, idem pour $SP \simeq d$ dans le facteur :

$$a_P(M) = K' \iint t(P) e^{-ikSP} e^{-ikPM} d\Sigma \quad (1.3)$$

avec

$$PM = D \left[1 + \left(\frac{x - X}{D} \right)^2 + \left(\frac{y - Y}{D} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.4)$$

$$SP = d \left[1 + \left(\frac{x_0 - X}{D} \right)^2 + \left(\frac{y_0 - Y}{d} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.5)$$

Transition On va s'intéresser à ce que devient cette expression dans des conditions particulières dites de Fraunhofer.

2 Diffraction de Fraunhofer

[Tec&Doc, Hprépa, TD]

2.1 Conditions

[Tec&Doc, p. 140] S et M sont à l'infini.

2.2 Amplitude et intensité diffractée par une pupille plane

Faire le schéma de [Hprépa, p. 180] $(PM) = (OM) - \vec{OP} \cdot \vec{u}_d$. Terme de phase global on s'en fout (n'a pas d'influence sur l'éclairement). On fait pareil avec $(SP) = (SO) + \vec{u}_i \cdot \vec{OP}$. Finalement :

$$a_P(M) = K' \iint t(P) e^{-ik(\vec{u}_d - \vec{u}_i) \cdot \vec{OP}} d\Sigma \quad (2.1)$$

On reconnaît la transformée de Fourier du facteur de transmission.

[Houard, p. 329] L'amplitude de l'onde représente le spectre en fréquences spatiales qui décrivent via la transmittance la structure de l'objet.

[TD] On a une relation de transformée de Fourier entre $t(x, y)$ et le profil d'intensité diffracté dans le cadre de la diffraction de Fraunhofer. On appelle plan de Fourier le plan où l'on observe cette figure de diffraction.

2.3 Réalisation pratique

[Houard, Tec&Doc, Hprépa, Femto] Exemple : montage à deux lentilles : $u_{d,x} \simeq \frac{x}{f'}$, etc.

Montage à une lentille (si le temps, sinon tant pis).

Transition On a maintenant tous les outils pour comprendre la diffraction, on va s'intéresser aux figures de quelques objets.

3 Quelques exemples de pupilles

3.1 Diffraction par une fente rectangulaire

Calcul : *sinc*. Discussion [Hprépa, Tec&Doc]

Expérience quantitative

Mesure de la largeur d'une fente avec la caméra CCD.

3.2 Diffraction par un diaphragme circulaire

<https://web-labosims.org/animations/diffraction/diffraction.html>

Raisonner avec un cercle dans un carré [TD, Hprépa].

Si pas le temps, le montrer sans faire calcul. Tache d'Airy. Diamètre $1.22 \frac{\lambda}{R}$.

3.3 Propriétés de la diffraction de Fraunhofer

Ne pas tout faire si pas beaucoup de temps

A chaque fois, illustrer expérimentalement et/ou animation https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_en.html

[Piquemal] Tous les résultats suivants découlent des propriétés de la transformée de Fourier.

Déplacement de la source

[H-prépa, p. 188]

Translation

[Piquemal] La figure de diffraction est inchangée par translation de la pupille dans son plan. $t'(X, Y) = t(X - u, Y - v)$.

Ce résultat nous sera très utile pour toutes les pupilles formées de plusieurs motifs identiques : les deux trous d'Young, les deux fentes d'Young et les réseaux.

[Pérez, p. 273]

Dilatation

[Piquemal] Toute dilatation de la pupille dans une direction se traduit par une contraction de la figure de diffraction dans la même direction et toute contraction de la pupille dans une direction se traduit par une dilatation de la figure de diffraction dans la même direction.

Rotation

[Piquemal, Hprépa p. 191] Pupille et figure de diffraction forment un bloc pour une rotation autour de l'axe optique.

Illustration : https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_all.html?locale=fr

N.B. : Rotation de la pupille de θ_0 autour de l'axe optique. Il faut utiliser les coordonnées polaires dans le plan de la pupille : $k \cdot OP = k_x r \cos \theta + k_y r \sin \theta$. $t'(r, \theta) = t(X, \theta - \theta_0)$. On trouve $a'(k_x, k_y) = a(K_x, K_y)$ avec $K_x = k_x \cos \theta_0$ et $K_y = k_y \sin \theta_0$.

La figure de diffraction tourne du même angle dans le plan de l'écran. Pupille et figure de diffraction forment un bloc pour une rotation autour de l'axe optique.

Théorème de Babinet

[Tec&Doc, p. 150]

[Piquemal] La figure de diffraction de deux pupilles complémentaires est la même sauf en l'image géométrique de la source.

4 Application

Si le temps en section. Sinon en CCL.

4.1 Pouvoir séparateur

Limitation du pouvoir séparateur, critère de Rayleigh [Houard, p. 307. Hprépa, p. 186].

[Tec&Doc, p.]

4.2 Filtrage spatial

[Hprépa, p. 199]

Conclusion

Inconvénients : limite les appareils. Avantages : applications.

Conclure sur quelques applications (diffraction par les réseaux, holographie, analyse du speckle).

[Tec&Doc, p. 151] Universalité (ex : acoustique, diffraction de rayon X par les réseaux).

N.B. Lire les TDs de Clément pour les questions.

Description de l'expérience

Houard, p. 303

Expérience

Matériel

- Laser
- Fente réglable
- Écran
- Fente de largeur bien connue
- Caméra CCD + densité (ex : $d = 3$ ou 4)
- Porte-lentille
- Support élévateur
- Lentille CV de courte focale (ex : $f'_0 = 5mm$) pour avoir une source ponctuelle
- Porte lentille + support élévateur
- Deux autres lentilles CV (ex : $f'_1 = 10f'_0 = 5cm$ pour avoir des rayons à l'infini et $f'_2 = 15cm$ pour converger vers la caméra
- Écran
- Scotch noir
- Grande règle/mètre
- Pied à coulisse

- Trou circulaire très petit
- Chronomètre

Protocole

- ▷ Montage : source ponctuelle (laser + lentille de courte focale) $\rightarrow \mathcal{L}_1 \rightarrow$ Fente calibrée $\rightarrow \mathcal{L}_2 \rightarrow$ écran ou CCD dans le plan focale de \mathcal{L}_2
- ▷ Utiliser la caméra CCD avec le logiciel associé. Exporter les données
- ▷ Convertir pixel en μm . Pour la caméra Mightex, largeur d'un pixel = $8\mu m$.
- ▷ Importer sur Qtiplot. Centrer le pic maximal en zéro et enlever l'offset en translatant la courbe à 0
- ▷ Au choix :
 - Faire un ajustement en $\text{sinc}^2(Ax)$ avec $A = \frac{\pi a}{\lambda f'_2}$
 - Avec les curseurs, mesurer la distance entre les deux premières annulations de part et d'autre du pic $\Delta x = \frac{2\lambda f'_2}{a}$
 - Si vraiment cata, le faire en mode shlague en mesurant au pied à coulisse/règle la largeur du tirt central sur l'écran

Aspect quantitatif : Mesure de la largeur de la fente.

20

Diffraction par des structures périodiques

Niveau : L3

Prérequis :

- Interférences
- Diffraction de Fraunhofer (TF, diffraction par une fente, théorème de Babinet)

Bibliographie :

- Optique ondulatoire, Pascal Legagneux-Piquemal, PC, MP, PSI, PT. Nathan
- Tec&Doc Physique Spé MP. Gié et al.
- H-prépa bleu. Optique ondulatoire 2e année : MP-PC-PSI-PT. Brébec et al.
- Optique. Sylvain Houard. de boeck.
- Optique expérimentale. Sextant.
- Neil W. ASHCROFT. Physique des solides. EDP Sciences, 2002
- OU : Physique des électrons dans les solides I. Henri Alloul
- TD de C. Sayrin, Diffraction I & II.
- Images : <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/simu-diffraction.xml#p6>
- Animation (désordre) : <https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference-all.html?locale=fr>
- Animation : <https://femto-physique.fr/simulations/reseaux-construction-de-fresnel.php>

Notes Agrégats

- 2017 : Il faut traiter de diffraction par des structures périodiques et pas seulement d'interférences à N ondes.
- 2015 : Il est important de bien mettre en évidence les différentes longueurs caractéristiques en jeu.
- 2014, 2013, 2012 : Cette leçon donne souvent l'occasion de présenter les travaux de Bragg ; malheureusement, les ordres de grandeur dans différents domaines ne sont pas toujours maîtrisés.
- 2010, 2009 : La notion de facteur de forme peut être introduite sur un exemple simple. L'influence du nombre d'éléments diffractants doit être discutée.

Introduction

Vidéo CD <https://www.youtube.com/watch?v=F2vpp3weFcc>

Un CD sépare la lumière. Pourquoi ? Quel est phénomène en jeu ? Diffraction sur une structure périodique !

N.B. [Wiki] La technique du disque compact repose sur une méthode optique : un faisceau de lumière cohérente (laser) vient frapper le disque en rotation. Les irrégularités (appelées « pits », cavités dont la longueur varie entre 0,833 et 3,56 μm , et dont la largeur est de 0,6 μm) dans la surface réfléchissante de celui-ci produisent des variations binaires.

Ordinary pressed CD and DVD media are every-day examples of diffraction gratings and can be used to demonstrate the effect by reflecting sunlight off them onto a white wall. This is a side effect of their manufacture, as one surface of a CD has many small pits in the plastic, arranged in a spiral ; that surface has a thin layer of metal applied to make the pits more visible. The structure of a DVD is optically similar, although it may have more than one pitted surface, and all pitted surfaces are inside the disc.

1 Diffraction par un ensemble de structures

[TD C. Sayrin, Tec&Doc]

On se place dans le cadre de la diffraction de Fraunhofer.

1.1 Diffraction par un ensemble de structures

[Tec&Doc, p. 152 + TD Diffraction I]

Ensemble de N structures diffractantes **identiques**. On éclaire cet objet par une onde plane monochromatique. L'amplitude diffractée est $a(M) = K A_0 \iint t(P) \frac{e^{-i(k-k_0) \cdot OP}}{PM}$. On a $t(P) = \sum_n t_n(P)$ et $OP = OO_n + O_nP$. On injecte dans l'intégrale. t_n ne dépend que de O_nP car motifs identiques et O_iP indép' de i car structures identiques. $a(M) = a_{1,motif}(M) \sum_n e^{-i(k-k_0) \cdot OO_n}$.

[TD] La figure de diffraction obtenue est le produit d'un **facteur de structure**, qui ne dépend que de la répartition des structures sur l'écran diffractant, et d'un **facteur de forme**, qui ne dépend que de la forme d'une structure unique.

Eclairement On prend la norme au carré. Produit de l'éclairement diffracté par un motif et de la fonction d'interférence.

Application Diffraction de poudre. [TD] Cette situation est particulièrement utile quand l'on cherche, par exemple, à connaître le rayon moyen des grains d'une poudre. En répartissant de façon aléatoire les grains sur une plaque, la figure de diffraction obtenue pour l'ensemble des grains est la figure de diffraction d'un grain de diamètre moyen. En montage, on peut par exemple mesurer le diamètre de spores de lycopode par cette méthode.

N.B. Il faut décomposer $OP = OO_i + O_iP$ pour que dans l'amplitude diffractée pour un seul motif, on ait bien un point de référence O_i qui fasse partie de la pupille.

Transition On distingue deux cas.

1.2 Structures réparties de façon aléatoire

[TD] lorsque le nombre de motifs devient grand, le terme de structure vaut N . Si on a N motifs répartis aléatoirement, on obtient la figure de diffraction d'un seul motif mais N fois plus intense qu'avec un motif unique.

N.B. Somme infinie d'exponentielles complexes nulle : On peut le voir en prenant la partie réelle (éclairement réel). Somme de cosinus (variable aléatoire), ça revient à prendre une moyenne dans la limite « thermo ». Ça donne 0. On peut aussi le voir avec une somme de termes qui se compensent. Lire <https://femto-physique.fr/optique/interference-a-N-ondes.php>.

1.3 Structures périodiques : le réseau

Description d'un réseau.

Eclairement

[Hprépa, p. 217] Calcul de l'éclairement. $I(M) = I_0 \left(\frac{\sin \frac{N\varphi}{2}}{\frac{\varphi}{2}} \right)^2$.

On montre la simulation <https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference-all.html?locale=fr>. Jouer sur le désordre.

Intérêt

<https://femto-physique.fr/simulations/reseaux-construction-de-fresnel.php>

[Piquemal] On constate d'une part que les franges très brillantes sont toujours situées au même endroit (figures 1 et 2), et que les franges brillantes des interférences à deux ondes deviennent de plus en plus fines et, d'autre part, que des franges beaucoup moins brillantes apparaissent entre les franges très brillantes. Quand N augmente, ces dernières disparaissent et ils ne restent plus que des pics fins correspondant aux interférences à deux ondes entre deux motifs consécutifs. L'effet des interférences à N ondes cohérentes est essentiellement directif : l'intensité n'est maximale que dans certaines directions et quasi nulle ailleurs.

L'intérêt est évident en spectroscopie : si la source contient deux longueurs d'onde très proches, elles seront d'autant mieux séparées que les franges brillantes correspondant à chacune d'entre elles seront fines.

Transition On va voir comment on peut utiliser cette étude préliminaire pour obtenir des informations sur la source dans un premier temps, puis sur l'objet diffractant dans un second temps.

2 Étude spectrale de la source

(Pour info : Deux types : par réflexion et par transmission. Aussi : d'amplitude et de phase.)

Formule des réseaux

[Tec&Doc, p. 162. Hprépa, p. 221. TD]

Formule des réseaux (par transmission). Ordre de diffraction.

Expérience

Détermination du spectre d'une lampe à vapeur de mercure [Houard, p. 320 et p.340].

Retour sur le CD

[Hprépa, p. 230]

3 Étude de la structure diffractante

[TP Sayrin, Physique du solide, lire aussi Alloul]

http://www.lkb.upmc.fr/cqed/wp-content/uploads/sites/14/2020/10/optique_TD_diffraction_2_corrige.pdf

Les atomes ou molécules d'un cristal sont ordonnés selon un arrangement régulier de motifs en 3 dimensions, formant ainsi un cas particulier de réseau.

3.1 Nécessité des rayons X

[Tec&Doc, p. 152 et p. 476].

[Piquemal] Ce phénomène a lieu dans tous les domaines de la physique, pour toutes les ondes de longueur d'onde arrivant sur un objet dont l'échelle typique d de variations spatiales est du même ordre de grandeur. Si on veut explorer un cristal dont la maille est de l'ordre de quelques 0,1 nm, alors il faut disposer d'une onde de longueur d'onde C'est pourquoi on utilise des rayons X.

On peut donc retenir comme critère : la diffraction est perceptible pour d inférieur à la centaine de d étant une longueur caractéristique des variations spatiales de l'objet.

3.2 Loi de Bragg

[Piquemal, p.189, TD Clément, Ashcroft, p. 112]

On suppose que les plans parallèles d'atomes présents dans le cristal agissent comme des miroirs semi-réfléchissants, chaque plan ne réfléchissant qu'une partie du rayonnement incident.

Quelle est la condition, appelée Loi de Bragg, sur la distance d entre les plans, la longueur d'onde λ du rayonnement et son angle d'incidence θ sur les plans considérés pour observer une amplitude diffractée non nulle ?

Faire le calcul de la différence de marche pour le réseau de Bragg : On simplifie le problème en considérant que le cristal est formé de plans équidistants, et que ces plans réfléchissent la lumière. Le modèle de Bragg est un modèle simple qui permet de comprendre ce qu'il se passe. Deux plans successifs forment alors un système équivalent à une lame d'air.

On note I et J les points d'intersection entre les deux rayons et les plans, H et K les points projetés (pour utiliser Malus). La différence de marche : $\delta = HK + JK = 2d \sin \theta$. On a donc, pour les rayons lumineux réfléchis entre deux plans successifs, une différence de marche

$$\delta = 2d \sin \theta. \quad (3.1)$$

3.3 Condition de Laue [facultatif]

[Ashcroft, TD]

3.4 Exploitation

La répartition des pics de diffraction permet de remonter à d . Pour le mesurer, on peut soit faire varier la longueur d'onde λ , soit l'angle d'incidence θ (méthode du cristal tournant, méthode des poudres).

Méthode du cristal tournant Cette méthode utilise des rayons X monochromatiques, mais permet la variation de l'angle d'incidence. En pratique, la direction du faisceau de rayons X est maintenue fixe, et c'est l'orientation du cristal qui varie. Dans la méthode du cristal tournant, le cristal tourne autour d'un axe fixe, et tous les pics de Bragg qui apparaissent pendant la rotation sont enregistrés sur une pellicule.

Diffraction de poudre Un diffractomètre produit des ondes à une fréquence déterminée, qui est donnée par sa source. La source sont souvent des rayons X, parce qu'ils sont le seul type d'ondes avec une fréquence correcte pour l'inter-diffraction de l'échelle atomique. Cependant, les électrons et les neutrons sont également des sources communes, avec leur fréquence déterminée par l'Hypothèse de De Broglie. Lorsque ces ondes atteignent la cible, les atomes de la poudre analysé agissent comme un réseau de diffraction, produisant des points lumineux à des angles particuliers. En mesurant l'angle où se produisent ces points lumineux, l'espacement du réseau de diffraction peut être déterminé par la loi de Bragg.

Conclusion

On peut étudier d'autres structures dans la nature comme l'aile du papillon morpho.

- <https://www.youtube.com/watch?v=M-cwYrRcCAE>
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Morpho_\(genus\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Morpho_(genus))
- https://web.archive.org/web/20110716081623/http://newton.ex.ac.uk/research/emag/butterflies/pdf/Vukusic_Morpho.pdf

La diffraction n'a pas que des inconvénients. Elle présente un certain nombre d'applications [Houard] : spectroscopie en astronomie, filtrage spatial (ex : strioscopie), microscopie électronique en transmission ou à balayage (diffraction d'électrons).

Description de l'expérience

[Houard p. 320/340. Sextant, p.4]

Expérience

Matériel

- Lampe à vapeur de mercure (basse pression)
- Fente réglable
- Diaphragme circulaire
- Condenseur (lentille de $f'=5\text{cm}$ ou 7cm) [pour augmenter la luminosité, facultative]
- Réseau 3000 traits/cm
- Lentille achromatique $f'=20\text{cm}$
- Écran (lourd si possible)
- Feuilles blanches
- Règle $> 1\text{m}$
- Petite règle
- Scotch

Protocole

- ▷ Faire le montage du Houard. N.B.
 - Distance écran-réseau $D = 1\text{m}$
 - Fraunhofer à une lentille : conjuguer par la lentille l'écran et la fente source
- ▷ Prendre une feuille blanche et tracer les différentes raies afin de les mesurer à la règle
- ▷ Tableau récapitulatif avec les λ mesurée et tabulées.

Aspect quantitatif : Mesure des longueurs d'ondes associées aux raies. Voir notice et Sextant (UV, violet, violet, vert, doublet jaune) pour les valeurs et Houard pour les calculs : $\lambda \simeq \frac{dy_k}{D}$ avec $d = \frac{1}{3000}\text{cm}$ le pas du réseau et y_k la distance entre la raie à l'ordre 1 et la raie blanche de l'ordre 0. Hypothèses :

- Incidence quasi-normal $\theta_i \simeq 0$
- $\tan \theta = \frac{y_k}{D} \simeq \theta \simeq \sin \theta$. Rq : on pourrait le faire exactement avec sin et tan, surtout si $\frac{y_k}{D}$ est pas si petit (vérifier l'hypothèse avant).

21

Absorption et émission de la lumière

Niveau : 2ème année CPGE

Prérequis :

- Modèle du corps noir

Bibliographie :

- Dictionnaire de physique. Taillet.
- Physique atomique 1. Atomes et rayonnement. Cagnac, Tchang-Brilley et Pebay-Péroula. DUNOD
- Tout-en-un PC. Sanz. Dunod.
- Corps noir : Tec&Doc MP. Gié et al.
- Les nouveaux précis Tout-en-un PC. Bréal. Tisserand, Brendels et al.
- Optique. Houard.
- Physique PC. Pascal Olive. ellipses. p. 783.
- https://perso.ens-lyon.fr/sylvio.rossetti/AGREG/LP/LP37_Absorption%20et%20emmission%20de%20la%20lumi%e8re/LP37_Absorption_et_emmission_de_la_lumi_re.pdf
- Bonus important : Optique. Hecht.

Notes agrégat

- 2017 : Cette leçon ne peut se résumer à une présentation des relations d'Einstein.
- 2015 : Cette leçon peut être traitée de façons très variées, mais il est bon que les candidats aient réfléchi aux propriétés des diverses formes de rayonnements émis, aux dispositifs exploitant ces propriétés et au cadre théorique permettant de les comprendre.
- Jusqu'en 2013, le titre était : Absorption, émission spontanée ou induite du rayonnement. Caractéristiques et applications.
- 2014, 2013, 2012, 2011 : Trop souvent, il y a confusion entre les processus élémentaires pour un atome et un ensemble d'atomes. De même le candidat doit préciser au cours de sa leçon le caractère monochromatique ou non du champ de rayonnement qu'il considère et plus généralement les caractéristiques du rayonnement stimulé.

Introduction

Intro : J'aimerais qu'on commence cette leçon en partant de deux situations expérimentales et qu'on essaie d'analyser un petit peu ce qu'on observe. On va s'intéresser à deux sources de lumière :

Situation 1 On envoie la lumière du soleil sur un prisme : le faire si possible, sinon https://www.youtube.com/watch?v=sT_EJKolE8Y

Situation 2 Envoyer une lampe à vapeur de sodium ou de mercure sur un réseau.

- Dans les deux cas, on observe les longueurs d'ondes composant la lumière de la source : on parle de **spectre d'émission**.
- Cas 1 : spectre continu (source thermique). Cas 2 : spectre discret (source spectrale).

En fait, la situation 1 a déjà été traitée dans le cours de thermodynamique : c'est le rayonnement d'un corps noir. Dans cette leçon, nous allons nous intéresser non pas aux sources thermiques, mais aux sources lumineuses, celles pour lesquelles la lumière émise dépend de la nature des atomes mis en jeu et non pas de la température d'un filament.

[wiki] La théorie du rayonnement prévoit que le rayonnement émis par un corps chauffé est proportionnel à la température absolue et inversement proportionnel à la longueur d'onde portée à la puissance 4. Au cours de l'année 1900, des expériences montrent que cette théorie du rayonnement fonctionne bien pour des émissions allant de l'infrarouge au vert. Par contre, pour le bleu, le violet et, plus encore, l'ultraviolet, les résultats ne concordent pas du tout avec cette théorie, qui est mise en échec → **catastrophe ultraviolette**.

Autre problème : ce modèle n'explique pas le spectre continu qu'on observe avec la lampe à vapeur de Mercure.

C'est pour apporter une réponse à ce problème de théorie du rayonnement que le physicien allemand Max Planck propose à la fin de l'année 1900 une idée révolutionnaire qui, pour la première fois, postule que les interactions entre la lumière et la matière se font **de manière quantifiée**.

Dans cette leçon, on va voir comment cette quantification permet de rendre compte des interactions lumière-matière qui se manifestent dans des phénomènes de notre vie de tous les jours.

Mais de quoi parle-t-on précisément ?

1 Interaction lumière-matière

1.1 Approche expérimentale

Parmi les interactions lumière-matière, on distingue [sur slide]

Émission spontanée

[Taillet p. 259] Déf. [Cagnac]

Sources spectrales Rayonnement par émission spontanée. Ce sont des lampes à vapeurs atomiques, qui fournissent des spectres de raies. Ces lampes nécessitent un autotransformateur spécial. En effet, une haute tension est nécessaire pour établir une décharge entre les électrodes, les électrons accélérés excitant les atomes par collision (ceux-ci émettent alors de la lumière en se désexcitant). En TP, on utilise fréquemment des lampes à vapeur de sodium (le doublet jaune du sodium fournit également la lumière des réverbères) ou des lampes à vapeur de mercure (qui émettent plusieurs raies). Ces dernières peuvent être

- soit basse pression (raies fines, effet Doppler dominant, émission par unité de surface faible)
- soit haute pression (raies élargies, effet collisionnel important mais Doppler toujours dominant, émission par unité de surface élevée). Ces sources n'atteignent leur régime de fonctionnement permanent qu'après plusieurs minutes : il faut donc les brancher en avance et éviter de les éteindre, car elles ont besoin de refroidir avant d'être rallumées. Ex : Lampes dites Philora.

Principe de fonctionnement : [Olive, p. 118] On fait éclater des étincelles dans un tube contenant un gaz, provoquant une excitation des atomes. Un rayonnement correspondant à un spectre de raie est émis. Lorsque P ou T augmentent, les chocs entre atomes augmentent, ce qui induit une désexcitation plus rapide : le temps de vie de l'état et la durée du train d'onde diminuent. Les raies sont plus larges. L'effet Doppler est souvent le facteur prépondérant de l'élargissement.

Expérience Mesure raie d'émission du mercure.

Absorption

[Taillet p. 5] Déf. C'est le processus inverse de l'émission.

Expérience Spectre d'absorption de la rhodamine. Puis émission en luminescence.

<https://www.123couleurs.fr/explications/explications-lumi%C3%A8re/tl-fluophospho/>

Transition Description quantitative de ces phénomènes.

1.2 Modèle d'Einstein

Hypothèses du modèle

- Atomes : Résonance optique : deux niveaux d'énergie (justifier que bcp de pbs en physique peuvent se ramener à deux niveaux). Résonance (attention : Les niveaux ont une largeur, donc cette condition n'est pas aussi stricte)
- Lumière : $E = h\nu$. A cause de la largeur de la raie, on va considérer une densité spectrale.
- N_1, N_2 . Equilibre thermo et loi de Boltzmann.

Tableau avec les trois processus à remplir au fur et à mesure. Décrire schématiquement avec les deux niveaux.

N.B. [Sylvio] Pertinence d'un système à deux niveau : L'hypothèse des deux niveaux est peu restrictive parce que l'interaction électromagnétique concernant les processus de transition est résonante autour d'une fréquence centrale, ν_0 . Elle ne met donc en jeu que deux niveaux résonants tels que $E_2 - E_1 = h\nu_0$.

1.3 Coefficients d'Einstein

[Pascal Olive] Essayer de faire rapidement cette partie.

Spontanée On a vu la lampe spectrale. Modélisation : $A_{21}(\nu)$. Les OE associées aux photons émis ont des direction et des polarisations aléatoires. $\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2$. Unité : A_{21} en s^{-1} .

[Wiki] A_{21} gives the probability per unit time that an electron in state 2 with energy E_2 will decay spontaneously to state 1 with energy E_1 , emitting a photon with an energy $E_2 - E_1 = h\nu$. Due to the energy-time uncertainty principle, the transition actually produces photons within a narrow range of frequencies called the spectral linewidth.

[Wiki] B_{21} gives the probability per unit time per unit energy density of the radiation field per unit frequency that an electron in state 2 with energy E_2 will decay to state 1 with energy E_1 , emitting a photon with an energy $E_2 - E_1 = h\nu$.

Absorption $\frac{dN_1}{dt} = -B_{12}u_\nu(\nu_0)N_1$. Unité : B_{12} en $J^{-1}m^3s^{-2}$.

[Wiki] B_{12} gives the probability per unit time per unit energy density of the radiation field per unit frequency that an electron in state 1 with energy E_1 will absorb a photon with an energy $E_2 - E_1 = h\nu$ and jump to state 2 with energy E_2 .

Transition Et le Laser ? On en a pas parlé : ça utilise autre chose.

Stimulée Vidéo [Absorption sodium](#). Modélisation : $\frac{dN_2}{dt} = -B_{21}u_\nu(\nu_0)N_2$. Unités : u_ν en $Jm^{-3}s^{-1}$ et B_{21} en $J^{-1}m^3s^{-2}$. Un photon est émis avec la même fréquence, direction, polarisation et en phase que le photon incident.

[Taillet p. 132] Phénomènes d'absorption et d'émission aléatoires \rightarrow approche probabiliste. Mais on considère un grand nombre d'atomes.

Attention à bien distinguer le cas monochromatique du cas polychromatique

[Sanz] Remplir le tableau avec

- Coeff d'Einstein (Proba de transition par unité de temps) et unités
- Évolution temporelle [Précis p. 690 ; Cagnac p. 102]
- Régime stationnaire (à l'équilibre dynamique et non pas thermodynamique !)
- Caractéristiques de chaque processus

Équation d'évolution : On écrit l'équation totale impliquant tous les processus.

Transition Quel est le lien entre ces coefficients ?

1.4 Relation entre les coefficients

[Précis p. 690 ; Cagnac p. 103] **On suppose maintenant l'équilibre thermodynamique.** Loi de Boltzmann pour N_i . $\frac{N_1}{N_2} = e^{\beta h\nu_0}$. Dans la limite $T \rightarrow \infty$, $\frac{N_1}{N_2} = 1$ et $u_\nu \rightarrow \infty$, impliquant : $\frac{B_{21}}{B_{12}} = 1$. Si les atomes sont en équilibre avec le rayonnement il faut que la densité spectrale d'énergie coïncide avec celle de Planck [Sanz, Houard p. 382, **Hecht, p. 604**]. Par identification avec la loi de Planck $u_\nu = \frac{8\pi h\nu_0^3}{c^3} \frac{1}{e^{\beta h\nu_0}}$, on trouve $\frac{A_{21}}{B_{12}} = \frac{8\pi h\nu_0^3}{c^3}$.

Insister sur la nécessité de l'émission stimulée.

N.B. (voir si j'en parle ou pas) En réalité, on a une largeur $d\nu$ autour de ν_0 dans ces processus [Sylvio] :

- Elargissement naturel : l'inégalité de Heisenberg temps-énergie implique une largeur spectrale de l'ordre de 10^{-5} nm.
- Élargissement collisionnel : les chocs entre particules modifient légèrement leurs états énergétiques. Ça dépend de la fréquence des chocs, donc de la section efficace et de la densité (donc de la pression, donc ils dominent dans les lampes haute pression). L'élargissement est de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-2} nm.
- Elargissement Doppler thermique : toutes les particules sont animées d'une vitesse, dont la répartition est isotrope. Par effet Doppler, toutes les émissions n'ont pas la même fréquence dans le référentiel du labo. Plus la température de la source est chaude, plus les vitesses sont élevées et plus l'effet est marqué. L'élargissement a le même ordre de grandeur que dans le cas de l'élargissement collisionnel, mais prédomine dans les lampes basse pression.

[JF] Discuter la largeur de raie liée à Heisenberg (cf. Sanz, p. 1068) et celle liée à l'élargissement par effet Doppler (cf. Cagnac, p. 24). On peut évoquer les méthodes de mesure de ces profils par interférométrie à division d'amplitude. Voir aussi Sanz, p. 1068).

2 Applications

2.1 Application à la chimie

[facultatif]

Bilan de puissance pour un système à deux niveaux soumis à une onde électromagnétique plane [Olive, p. 787]. Retrouver Beer-Lambert.

Expérience Remonter à la concentration de la rhodamine connaissant l et ϵ .

2.2 Application au laser

Animation introductive : https://www.youtube.com/watch?v=UDxdq_ogqR8

Laser = Light Amplification by Stimulated Emission Radiation

Comparaison à une lampe spectrale : le laser est monochromatique, directif, cohérent. Il faut [Houard] :

- Un milieu amplificateur
- Un cavité optique
- Un Système de pompage

2.3 Amplification par émission stimulée

[Précis, p. 692]

Nécessité d'une inversion de population : la variation de puissance $\delta P \propto [B_{21}N_2 - B_{12}N_1]$. Une amplification n'est possible que si $N_2 > N_1$. Or, à l'équilibre, $\frac{N_2}{N_1} = e^{-\beta h\nu_0} < 1$.

Système amplificateur = milieu dans lequel a été réalisé l'inversion de population tel qu'un cristal solide, un gaz ou un semi-conducteur, qui est capable d'amplifier la lumière. Ce milieu contient des atomes, des molécules ou des ions excitables.

Par exemple, par **pompage** (avec 3 niveaux). Le milieu amplificateur est « pompé » en lui fournissant de l'énergie, généralement sous forme de lumière (flash) ou d'électricité (décharge). Cette énergie d'excitation amène les atomes du milieu amplificateur à un état énergétique supérieur. En réalité, un pompage direct de 1 à 2 permet au maximum d'obtenir $N_1 = N_2$: On utilise un troisième niveau.

Ex : Laser He-Ne : He : état 0 et 3. Pompage de 0 à 3 par décharge électrique. He cède de l'énergie par choc à Ne. Ne passent de 0 à 2 tandis que He se désexcitent sans émettre de photons : inversion de population entre 1 et 2 de Ne. Puis émission stimulée de Ne de 2 vers 1, la désexcitation de 1 vers fonda se fait rapidement.

2.4 Rôle de la cavité optique

[Voir Sanz, Houar, Olive]

La cavité Fabry-Pérot affine le spectre en sélectionnant seulement certaines fréquences. La largeur des pics dépend du coefficient de réflexion énergétique du miroir, leur hauteur dépend de la fraction du rayonnement émis, qui correspond à des pertes énergétiques.

Une rétroaction optique positive est nécessaire pour amplifier et maintenir le processus d'émission stimulée. Cela est réalisé à l'aide d'un résonateur optique, qui est composé de deux miroirs parallèles. L'un des miroirs est partiellement réfléchissant, permettant à une partie de la lumière émise de s'échapper sous forme de faisceau laser, tandis que l'autre miroir est hautement réfléchissant, renvoyant la lumière à l'intérieur du résonateur.

Analogie avec l'oscillateur à pont de Wien [Olive] Chaîne d'action (μ) = milieu amplificateur. Chaîne de retour (rétroaction : β) = cavité optique. Elle laisse passer les fréquence propre. Le bouclage se fait par réflexion sur les miroirs. Seuls les modes pour lesquels $\mu\beta > 1$ peuvent naître dans la cavité. Pour n'avoir qu'un mode, soit on réduit la taille de la cavité, soit on diminue le coeff de réflexion d'un miroir : mais perte de puissance. En pratique, on introduit un filtre interférentiel très sélectif. Pour les lasers He-Ne, la bande de fréquence admise est du même ordre de grandeur que la largeur à mi-hauteur de la raie d'émission de longueur d'onde $\lambda_{0632.8} = \text{nm}$.

Conclusion

[Lire Olive, p. 792 et Houard]

Les lasers ont de nombreuses utilisations dans divers domaines en raison de leurs propriétés uniques.

- Communication : Les lasers sont utilisés dans les fibres optiques pour transmettre des signaux de communication à haute vitesse sur de longues distances. Ils sont essentiels pour les réseaux de télécommunications modernes.
- Médecine : Les lasers sont utilisés en chirurgie pour couper, cautériser et vaporiser les tissus de manière précise et contrôlée. Ils sont également utilisés dans des traitements médicaux tels que l'élimination des tatouages, l'épilation au laser et le remodelage de la cornée.
- Recherche scientifique : Les lasers sont utilisés dans de nombreux domaines de recherche, tels que la physique, la chimie et la biologie. Ils sont utilisés pour l'étude des propriétés des matériaux, la spectroscopie, l'imagerie, la manipulation de particules, la fusion nucléaire contrôlée et bien d'autres applications.
- Lecture optique : Les lasers sont utilisés dans les lecteurs de codes-barres, les lecteurs de DVD et les lecteurs de disques Blu-ray pour lire l'information enregistrée de manière précise et rapide.
- Télémétrie : mesure de la distance Terre-Lune [olive, p. 798].

On a vu une application. Une autre est celle du ralentissement ou refroidissement des atomes.

A savoir

- [Olive] Une onde parfaitement sinusoïdale (de durée infinie) n'existe pas dans la vraie vie (l'émission spontanée de 2 vers 1 doit avoir un début et une fin). Le principe d'Heisenberg montrer qu'il y a une indétermination de l'énergie ΔE d'autant plus grande que la durée de vie d'un atome dans l'état excité 2 est faible ($\Delta E\tau \sim h$). Comme la durée de vie dans l'état 1 est plus grande (état plus stable), on peut négliger ΔE_1 et considérer l'indétermination sur la fréquence $\Delta\nu$ liée $\Delta E_2 : \Delta\nu \sim \frac{1}{\tau}$. Or (Fourier), la durée d'un train d'onde $\Delta t\Delta\nu \sim 1$. CCL : la durée d'un train d'onde est du même ordre de grandeur que celle de l'état excité. Ces grandeurs (durée, amplitude, phase) varie aléatoirement autour d'une valeur moyenne d'un train d'onde l'autre.
- Le temps de cohérence est la durée d'un train d'onde $\tau_c = \Delta t$.
- La loi de Planck donne la luminance (puissance par unité de surface qui émet dans une direction normale par unité d'angle solide par unité de fréquence) vs la longueur d'onde. Au fur et à mesure que la température diminue, le sommet de la courbe de rayonnement du corps noir se déplace à des intensités plus faibles et des longueurs d'onde plus grandes.
- En TP : On utilisera essentiellement deux types de sources lasers avec des puissances de l'ordre du mW. Les lasers hélium-néon, ayant pour avantage d'être très monochromatiques (longueur d'onde de 632,8 nm pour le rouge, 543 nm pour le vert), peu divergents (avec une ouverture de l'ordre de 10^{-3} rad) mais très encombrants (à cause de la cavité Fabry-Pérot). les diodes lasers, beaucoup plus portables, mais avec une divergence de faisceau un peu plus grande et une longueur d'onde à calibrer. Un laser polarisé est un laser qui n'émet que sur une polarisation bien définie. Un laser non polarisé est un laser dont la polarisation fluctue au cours du temps. Par conséquent, en plaçant un polariseur après un laser non polarisé, on obtient une source polarisée mais dont l'intensité fluctue.
- **Sources thermiques** : Rayonnement thermique émis par désexcitation par chocs thermiques. Elles ont un spectre continu dont l'intensité dépend de la longueur d'onde. Elles constituent une bonne première approximation de la lumière blanche (spectre plat dans le visible). Exemples :
 - Lampes à incandescence ordinaires : Le filament de tungstène est porté à une température d'environ 2800 K. Il est placé sous vide, ou dans une atmosphère gazeuse inerte, pour éviter l'oxydation. La répartition spectrale est à peu près celle d'un corps noir porté à la même température (avec donc une part importante du rayonnement dans l'infrarouge).
 - Lampes à incandescence Quartz-Halogène (en particulier Quartz-Iode) : Le principe est le même que pour les lampes précédentes, mais l'ajout d'un gaz halogène à l'intérieur de l'ampoule augmente son temps de vie, en limitant la vaporisation du tungstène. Cela permet donc de porter le filament à une température plus élevée (3200 K), ce qui augmente l'intensité lumineuse et décale le maximum d'émission du spectre vers le visible.

- En raison de l'énergie thermique, les particules subissent des vibrations et des collisions aléatoires, ce qui modifie constamment leurs trajectoires et leurs vitesses. Ces variations créent des fluctuations rapides dans leur mouvement (« dipôle oscillant »), ce qui se traduit par l'émission de photons.
- La différence clé entre la fluorescence et la phosphorescence réside dans la durée de l'émission lumineuse après l'excitation. La fluorescence émet de la lumière immédiatement et cesse rapidement après l'excitation, tandis que la phosphorescence émet de la lumière même après la fin de l'excitation, avec une durée de vie plus longue.
- Y a aussi les LEDs. Principe : La recombinaison d'un électron et d'un trou d'électron dans un semi-conducteur conduit à l'émission d'un photon. Contrairement à l'émission spontanée, l'émission lumineuse dans une LED est basée sur l'émission stimulée déclenchée par l'application d'un courant électrique.
- La diffusion est un phénomène passif et non radiatif. Elle ne modifie pas l'état d'excitation ou d'émission des particules impliquées, mais plutôt la direction de propagation de la lumière. La diffusion est responsable de phénomènes tels que la diffusion Rayleigh (responsable de la couleur du ciel) et la diffusion de la lumière dans les matériaux dispersifs.

Description de l'expérience

TP Spectroscopie

Expérience

Matériel

Spectre d'émission de la lampe Hg + lumière

- Prisme
- Lampe à vapeur de mercure
- Fente réglable
- Diaphragme circulaire
- Condenseur (lentille de $f'=5\text{cm}$ ou 7cm) [pour augmenter la luminosité, facultative]
- Réseau 3000 traits/cm
- Lentille achromatique $f'=20\text{cm}$
- Écran (lourd si possible)
- Feuilles blanches
- Règle $> 1\text{m}$
- Petite règle
- Scotch

Spectre d'absorption de la rhodamine

- Lampe quartz-iode
- Diaphragme circulaire
- Spectromètre USB
- Fibre optique
- Cuve éthanol
- Cuve rhodamine 610+éthanol
- Support mini-potence avec trou
- Filtre vert.

Protocoles

Protocole raie Mercure [Houard p. 320/340. Sextant, p.4]

- Faire le montage du Houard. **N.B.**
 - Distance écran-réseau $D = 1\text{m}$
 - Fraunhoffer à une lentille : conjuguer par la lentille l'écran et la fente source
- Prendre une feuille blanche et tracer les différentes raies afin de les mesurer à la règle
- Tableau récapitulatif avec les λ mesurée et tabulées.

Aspect quantitatif : Mesure des longueurs d'ondes associées aux raies. Voir notice et Sextant (UV, violet, violet, vert, doublet jaune) pour les valeurs et Houard pour les calculs : $\lambda \simeq \frac{dy_k}{D}$ avec $d = \frac{1}{3000}\text{cm}$ le pas du réseau et y_k la distance entre la raie à l'ordre 1 et la raie blanche de l'ordre 0. Hypothèses :

- Incidence quasi-normal $\theta_i \simeq 0$
- $\tan \theta = \frac{y_k}{D} \simeq \theta \simeq \sin \theta$. Rq : on pourrait le faire exactement avec sin et tan, surtout si $\frac{y_k}{D}$ est pas si petit (vérifier l'hypothèse avant).

Protocole Rhodamine <https://omlc.org/spectra/PhotochemCAD/html/009.html>

- ▷ Brancher la fibre optique au spectro usb et la mettre sur un support trou.
- ▷ Lancer SpectraSuite. Régler le temps d'intégration si besoin (par exemple : 100ms).
- ▷ Faire le noir (lumière éteinte) et le blanc (lumière+cuve éthanol) en appuyant sur les deux ampoules.
- ▷ Mettre la Rhodamine. Visualiser le spectre d'absorption. Noter $\lambda_{abs} = 542\text{nm}$
- ▷ Visualiser le spectre de transmission. C'est le complémentaire de l'absorption.
- ▷ Mettre un filtre vert. Noter les longueurs d'onde transmises du filtre (539nm et 804nm) sans et avec la rhodamine. Constater que le vert (539nm) est fortement absorbé.
- ▷ On met la fibre optique sur le côté de la cuve (pour s'affranchir de la lumière incidente de la lampe et avoir le signal le plus fort possible) et voir une couleur apparaître (autour de $\lambda_{em} = 610\text{ nm}$) différente de la couleur excitatrice (vert).
- ▷ Observer que la luminescence a lieu à des énergies inférieures à celle de la lumière excitatrice.
- ▷ La raie fine excitatrice n'est pratiquement pas visible sur le spectre précédent, car le phénomène de diffusion est ici faible devant celui de luminescence.
- ▷ CCL : en transmission : la couleur est celle du complémentaire du vert (magenta). En luminescence : la couleur est celle de $\lambda_{em,tho} = 610\text{ nm}$ correspondant au orange.

Aspect quantitatif : Mesure des raies de la lampe Hg.
Mesure de λ_{abs} et λ_{em} pour la rhodamine.

22

Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques

Niveau : L3

Prérequis :

- Électromagnétisme dans les milieux aimantés

Bibliographie :

- Electromagnétisme MP, PC, PSI. Daniel Mauras. Physique-Prépa-Chimie.
- Physique de l'état solide. Charles Kittel. Science Sup.
- H-prépa. Electromagnétisme 2ème année PC, PSI.
- Bertin, Faroux, Renault. Electromagnétisme 4 : milieux diélectriques et milieux magnétiques.
- Tec&Doc Physique PSI-PSI*. Olivier, More & Gié.
- Physique PSI-PSI* Tout-en-un. Dunod.
- Électronique II. H-Prépa 2ème année PSI-PSI*.
- Électronique – Conversion de Puissance. PSI-PSI*. ellipses. Taupe-niveau. Meiler, Irlinger & Kempf.
- Physique. PSI. Pascal Olive.
- Bonus : sujet agrégation 2019, problème de physique.

Notes agrégats

- 2017 : L'introduction des milieux linéaires en début de leçon n'est pas judicieuse.
- 2016 : Un bilan de puissance soigné est attendu. Jusqu'en 2013, le titre était : Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques. Applications.
- 2009, 2010 L'intérêt du champ H doit être clairement dégagé. L'obtention expérimentale du cycle d'hystérésis doit être analysée.

Introduction

Parler des milieux aimantés (para, dia, ferro) [Mauras]. Donner des exemples de matériaux.

1 Aimantation des matériaux ferromagnétiques

[Oliv0, p. 825] Dans la matière, les charges et les courants peuvent être libres ou liées. ρ_p et j_p (liés) ne peuvent pas être directement mesurés (contrairement aux libres).

Milieu magnétique : Il existe un moment magnétique d^3m dans un volume mésoscopique $d\tau$. On montre que $\rho_p = 0$, $j_p = \nabla \wedge M$ où $M = \frac{d^3m}{d\tau}$ est l'aimantation.

N.B. [wiki] Le moment magnétique est une grandeur vectorielle qui permet de caractériser l'intensité d'une source magnétique. Cette source peut être un courant électrique, ou bien un objet aimanté. L'aimantation est la distribution spatiale du moment magnétique. Elle caractérise à l'échelle macroscopique la capacité d'un matériau à se comporter comme un aimant.

Équation de Maxwell-Ampère : $\nabla \wedge H = j_l$ avec $H = \frac{B}{\mu_0} - M$ l'excitation magnétique et j_l courants libres. Théorème d'Ampère : $\oint H \cdot dOM = i_l$ (courant libre). Les sources de H sont les courants libres alors que les sources de B sont les courants libres et l'aimantation (courants liés).

N.B. Fundamentally, contributions to any system's magnetic moment may come from sources of two kinds : motion of electric charges, such as electric currents ; and the intrinsic magnetism of elementary particles, such as the electron.

[wiki] Any molecule has a well-defined magnitude of magnetic moment, which may depend on the molecule's energy state. Typically, the overall magnetic moment of a molecule is a combination of the following contributions, in the order of their typical strength :

- magnetic moments due to its unpaired electron spins (paramagnetic contribution), if any,
- orbital motion of its electrons, which in the ground state is often proportional to the external magnetic field (diamagnetic contribution)
- The combined magnetic moment of its nuclear spins, which depends on the nuclear spin configuration.

Transition M et B sont la réponse à l'excitation H . On va étudier la réponse en fonction de l'excitation.

BFR

1.1 Courbe de première aimantation

- Courbe.
- Aimantation à saturation. Oug M_{sat}, B_{sat} .
- Température de Curie.
- Non linéarité

1.2 Interprétation en domaines de Weiss

- Domaines de Weiss, explique $M(H)$.
- Irréversibilité (transition).

N.B. Domaines de Weiss sont à l'échelle mésoscopique (de l'ordre de quelques μm).

2 Cycle d'hystérésis

Dire que si on redescend, on suit pas le même chemin. Tracer le cycle.

2.1 Étude expérimentale : transformateur

H-prépa

- Canalisation des ldc.
- Présentation du dispositif.
- Calculs théorème d'Ampère et le reste.
- Manip' : XY . $B(H)$.
- Mesure de B_{sat} , B_r , H_c .
- Comparer aux valeurs d'un ferro doux.

2.2 Aspects énergétiques

BFR, H-prépa, Tec&Doc, Olive p. 849

- Hystérésis
- Courants de Foucault
- Pertes cuivre

Transition : choisir le bon matériau pour limiter les pertes par hystérésis

2.3 Classement des milieux ferromagnétiques

[Peut être dans une section à part ou en conclusion selon le temps]

Doux vs dur. H_c , B_r , cycle, μ_r (grand $\mu_r \Rightarrow$ canalisation, lien entre μ_r et cycle.

Donner exemples. Applications.

Conclusion

On peut conclure sur les applications.

On peut aussi parler d'un autre aspect : la transition de phase ferro-para (montrer la ??vidéo.)

Description de l'expérience

Expérience

Matériel

- Transformateur variable (vrai) 220/110V
- Transformateur de Leybold démontable (deux bobines + le fer).
- Bobine $n_1 = 500$ spires et $n_2 = 250$ spires
- Rhéostat $R = 20 - 30\Omega$ (et non AOIP !)
- Résistance AOIP $R' (\times 10^5)$
- Capacité
- Oscilloscope
- Fils, câbles, etc.
- Chronomètre

Protocole

- ▷ Faire le montage du TP « Conversion de puissance »

▷ $R = 22\Omega$, $R' = 10^5\Omega$, $C = 5\mu F$.

▷ V_x au bornes de R (donne H) et V_y aux bornes de R' (donne B après intégration avec le circuit intégrateur $R'C$)

Aspect quantitatif : Mesure de B_{sat}, B_r, H_c .

23

Mécanismes de la conduction électrique dans les solides

Niveau : L3

Prérequis :

—

Bibliographie :

- Physique PC/PC*. Pascal Olive. ellipses (pour Drude : p.217).
- Électromagnétisme I. Bertin, Faroux, Renault (surtout pour la théorie des bandes, p.171).
- Physique de l'état solide. Charles Kittel. SCIENCES SUP.
- Physique des électrons dans les solides I. Henri Alloul
- Neil W. ASHCROFT. Physique des solides. EDP Sciences, 2002
- https://perso.ens-lyon.fr/sylvio.rossetti/AGREG/LP/LP47_M%E9canisme%20de%20conduction%20E9lectrique%20dans%20les%20solides/LP47_M_canisme_de_conduction__lectrique_dans_les_solides.pdf

Introduction

1 Modèle classique de la conduction électrique dans les métaux

1.1 Présentation du modèle de Drude

Hypothèses. Sens physique.

1.2 Origine des collisions

1.3 Loi d'Ohm

Discuter ordres de grandeur.

1.4 Limites

Le modèle de Drude permet bien de relier conductivité à temps de collision en revanche il ne prédit pas la bonne valeur du libre parcours moyen et la bonne évolution en température. La vitesse des électrons n'est pas donnée par \sqrt{T} (qui provient du gaz parfait classique) et le libre parcours moyen n'est pas limité par les collisions avec les ions du réseau. Le modèle de Drude ne prédit pas non plus l'existence de conducteurs et d'isolants. Il faut donc développer un modèle quantique.

2 Modèle des électrons libres (approche semi-classique)

2.1 Modèle

Un métal peut être décrit comme un gaz parfait de fermions dégénéré. Donner des ordres de grandeur de la température de Fermi et de la vitesse de Fermi.

Traiter les métaux comme un gaz de Fermions libres et introduire l'énergie de Fermi et la vitesse de Fermi. La vitesse de Fermi est 10 fois plus importante que la vitesse thermique et les libres parcours moyens associés sont 10 fois plus grands. Une interprétation des collisions provenant des interactions avec le réseau n'est alors plus possible.

2.2 Avantages et limites

3 Théorie des bandes (approche quantique)

Qu'est ce qui limite le transport dans un métal : les collisions avec les impuretés et les défauts ainsi qu'avec les phonons. La dépendance de la résistivité avec la température est reliée aux collisions avec les phonons (terme linéaire en T). Montrer des courbes de variation de résistivité/conductivité en fonction de la température (p 148 Kittel pour les métaux, p 127,128 129 Alloul, p565 Ashcroft et Mermin pour les semi-conducteurs).

3.1 Théorie des bandes

[Voir aussi Houard, p. 383]

Introduction à la théorie et classification des matériaux

La théorie quantique explique les bandes d'énergie dans un solide, et la différence entre métal, isolant et semi-conducteur. Donner des ordres de grandeurs de gap pour différents matériaux (comme Silicium, diamant).

Discuter l'existence de conducteurs ou d'isolants selon la position du potentiel chimique.

Parler des bandes permises et interdites. Bandes de valence et de conduction.

Semi-conducteurs

Discuter ensuite le cas des semi-conducteurs intrinsèques avec une dépendance exponentielle du nombre de porteurs avec la température. Ouvrir en conclusion sur le dopage chimique ou électrostatique et ses applications immense.

Bande interdite.

Porteurs intrinsèques.

Conductivité due aux impuretés.

Conclusion

Description de l'expérience

TP Série 0 : Mesures électriques

Expérience

Matériel

- Bobine de cuivre pur verni dans cristallisoir
- Thermocouple + lecteur
- Alimentation stabilisée (jusqu'à 15V)

- Voltmètre
- Ampèremètre
- Fils
- Eau + bouilloire + glace
- Chronomètre

Protocole

- ▷ Faire le montage 4 pointes du TP (ou directement faire la mesure avec le multimètre numérique.
- ▷ $R = \frac{V}{I}$.
- ▷ $R = \frac{\rho L}{S}$. Comparer avec la valeur tabulée $\sigma = 59.6 \cdot 10^6 \text{ S/m}$.
- ▷ Éventuellement faire plusieurs valeurs de V et I et faire un fit.
- ▷ Autre manip' : mettre de l'eau, suivre la variation de la tension avec la température.
- ▷ Tracer $\rho(T)$. Faire un fit linéaire.

Aspect quantitatif : Mesure de la conductivité électrique du cuivre (mesure 4 points). On pourra également effectuer cette mesure à différentes températures, en plongeant le fil dans un cristalliseur contenant de l'eau. Vérifier qu'on peut approximer localement la résistivité en fonction de la température par une loi affine (loi de Matthiessen). Le coefficient α , appelé coefficient de température, est donné dans le Handbook.

24

Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique

Niveau : L2

Prérequis :

- Équations différentielles linéaires.
- Électrocinétique (RLC)
- Mécanique du point
- Formalisme complexe
- Principe d'un laser.

Bibliographie :

- Dictionnaire de physique. Taillet, Villain, Febvre.
- Mécanique I 1ère année MPSI-PCSI-PTSI. H-prépa. Brébec.
- Les nouveaux Précis. Mécanique PCST. Clerc. Bréal.
- Mécanique 1ère année. Tec&Doc. Gié et Sarmant.
- <https://www.physagreg.fr/electrocinetique-5-resonances-rlc-serie.php>
- Expériences de physique : optique, mécanique, fluides, acoustique. Bellier, Bouloy, Guéant. 4e édition.
- Optique, Houard.
- Physique PC-PC*. Pascal Olive. ellipses
- Les nouveaux Précis, tout-en-un Physique PC. Tisserand et al. Bréal.
- Bonus : Acoustique des instruments de musique. Chaigne et Kergomard.

Notes agrégat

- 2015 : Présenter l'exemple célèbre du pont de Tacoma n'est pas pertinent, sauf s'il s'agit d'effectuer une critique d'une interprétation erronée très répandue.
- 2010 : L'analyse du seul circuit RLC est très insuffisante pour cette leçon. Le phénomène de résonance ne se limite pas aux oscillateurs à un degré de liberté.

Introduction

Verre qui se brise : <https://www.youtube.com/watch?v=47cPhhywv0o>
Pourquoi ? Phénomène de résonance.

Définition

Dico, Taillet.

Phénomène selon lequel l'excitation périodique d'un système à une fréquence ω proche de l'une de ses fréquences propres ω_0 provoque une réponse de très forte amplitude.

Explication avec les mains : l'excitation pousse constamment le système dans la direction où son mouvement libre l'entraînait (cf. balançoire). Le phénomène de résonance est un effet d'accumulation de l'énergie en injectant celle-ci au moment où elle peut s'ajouter à l'énergie déjà accumulée, c'est-à-dire « en phase » avec cette dernière.

https://www.youtube.com/watch?v=B_u3sGbpM8M

1 Oscillations forcées d'un oscillateur linéaire amorti

1.1 Exemple en mécanique : l'oscillateur harmonique

Manip' ou simulation qualitative : https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Meca/Oscillateurs/ressort_rsfs.php

[précis, p. 171. Hprépa, p. 117] On va modéliser ça. Schéma de l'animation. Référentiel galiléen. u_x vers le bas. Forçage en A (x_A), extrémité du ressort. Equa diff $m\ddot{x} = -\alpha\dot{x} - k(x - l_0) + mg - f_{\text{archimede}} + x_A(t)$. On trouve Forme canonique

$$\ddot{x} + \frac{\omega_0}{Q}\dot{x} + \omega_0^2 x = F(t) \quad (1.1)$$

avec $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ et $2\alpha = \frac{\omega_0}{Q} = \frac{h}{m}$. On va s'intéresser à des excitations sinusoïdale $F(t) = A \cos(\omega t)$.

N.B Le facteur qualité $Q = \frac{1}{2\alpha}$ où α est l'amortissement : plus un système est amorti, plus le facteur qualité est faible (pas ou peu d'oscillation). Inversement, un amortissement nul (Q infini) correspond au cas de l'oscillateur harmonique. Q donne de l'ordre de grandeur du nombre de pseudo-oscillations visibles. De plus, en régime pseudo-périodique, pour $Q \gg 1$, $\frac{\Delta E_m}{E_m} = \frac{2\pi}{Q}$: Q chiffre la diminution d'énergie mécanique du système par pseudo-période : plus Q est grand, moins il y a de perte d'énergie par pseudo-période.

[précis, p. 138] Avoir en tête les différents cas du régime libre $F = 0$:

- $Q > \frac{1}{2}$ ($\alpha < 1$) : régime pseudo-périodique.
- $Q < \frac{1}{2}$: régime apériodique : décroissance sans oscillations.
- $Q = 0$: régime critique : relaxation à $x = 0$ est la plus rapide.

1.2 Résonance d'élongation

[Hprépa, chapitre V] Equation linéaire, $x = x_H + x_p$, avec x_0 solution de l'équation homogène qui tend vers 0 lorsque l'oscillateur est amorti. On s'intéresse donc uniquement à la solution particulière. Montrer https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Meca/Oscillateurs/ressort_rsfs.php OU BIEN <https://femto-physique.fr/simulations/resonance-oscillator.php> : On observe un régime transitoire, qui ne dure que peu de temps, suivi d'un régime sinusoïdal forcé.

On résout en complexe. Puis, on s'intéresse aux variations du module avec la pulsation. On cherche le max en dérivant (cf. https://perso.ens-lyon.fr/sylvio.rossetti/AGREG/LP/LP48_ph%e9nom%e8ne%20de%20r%e9sonance%20dans%20diff%e9rents%20domaines%20de%20la%20physique/LP48_ph_nom_ne_de_r%e9sonance_dans_diff_rents_domaines_de_la_physique.pdf).

[Hprépa, Précis, **Tec&Doc**] On trouve deux solutions. On distingue deux cas $Q < \frac{1}{\sqrt{2}}$ (0 unique solution), ou $Q > \frac{1}{\sqrt{2}}$: on a résonance à $\omega_r = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}$. La fréquence de résonance n'est pas stricto-sensu la fréquence propre. Montrer l'allure des courbes (slide ou Simulation). le système se comporte comme un filtre passe-bas ou passe-bande. Plus Q est grand, plus

[JF]

- A très faible fréquence d'excitation, le mobile suit la force excitatrice donc l'amplitude de l'excitateur se retrouve exactement sur le résonateur.
- A très haute fréquence d'excitation, le mobile est parfaitement incapable de suivre la force excitatrice de sorte qu'il fait quasiment du surplace. L'amplitude de la position est proche de 0.

[JF] la résonance n'a lieu que pour $Q > \frac{1}{\sqrt{2}}$, c'est-à-dire qu'il faut que les frottements ne soient pas trop forts (c'est logique!). On comprend aussi pourquoi, à la résonance en position, l'excitateur et le résonateur ne sont pas en phase. Avec les mains : si on commence à tirer sur le résonateur quand il est en bout de course on n'exploite pas correctement le délai dû à l'inertie du ressort ; il faut que l'excitateur commence à tirer un peu plus tôt pour que le ressort agisse sur le résonateur au moment exact où celui-ci arrive en bout de course. De la même manière on peut peut-être essayer de comprendre pourquoi la fréquence de résonance en tension n'est pas exactement la fréquence propre mais c'est pas trivial...

1.3 Résonance de vitesse

[Tec&Doc, Hprépa] $v = j\omega x$. La résonance en vitesse a lieu pour toute valeur de Q et $\omega_r = \omega_0$. Passe-bande.

[JF] - A très faible fréquence d'excitation, le mobile suit la force excitatrice qui va lentement donc sa vitesse tend vers 0.

- A très haute fréquence d'excitation, le mobile est parfaitement incapable de suivre la force excitatrice de sorte qu'il fait quasiment du surplace. Sa vitesse tend à nouveau vers 0.

Ainsi, il existe forcément une fréquence d'excitation pour laquelle l'amplitude en vitesse est maximale.

1.4 Équivalent en électrocinétique

Analogie électromécanique

[Hprépa exo 1, Tec&Doc] Circuit RLC série. Loi des mailles. On retrouve l'équation de la mécanique sur q avec les correspondances suivantes [Tableau slide].

- Élongation \longleftrightarrow Charge
- Vitesse \longleftrightarrow Courant

Application : le circuit RLC série

TP Électronique de base - Résonance

<http://maw33.free.fr/cours%20sup/32-100%20%C3%A9lectrocin%C3%A9tique%20RLC%20sinusoidal.pdf>

On étudie la réponse d'un circuit RLC série à une excitation produite par un échelon de tension délivré par un générateur BF (signal en crêteaux de période suffisamment longue).

Le montage RLC série peut-être étudié en tension ou en intensité et qu'il y a donc existence de deux types de résonances aux caractéristiques différentes.

Résonance en intensité

RLC série avec étude de la tension aux bornes de la résistance.

Il y a toujours résonance en intensité (par rapport à Q) contrairement à la résonance en tension aux bornes du condensateur.

On peut mesurer aussi le facteur de qualité (bande passante) : $Q = \frac{f_0}{\Delta f}$.

Résonance en tension

Jouer sur différents paramètres R , C pour changer

- $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

- $f_r = f_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}$.
- $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$.

1.5 Un exemple en chimie : polarité des molécules

[Hprépa, p. 179 (exo)] Exemple : HCl. Système à deux points A et B porteurs de charges $\pm \delta e$. Spectroscopie IR.

Montrer <https://www.chemtube3d.com/spectrovibhcl1-ce-final/>

Transition On vient de voir le cas où le système avait pu entrer en résonance pour une fréquence. Un système peut avoir plusieurs, voire une infinité de fréquence de résonance : c'est le cas des cavités.

2 Cavité résonnante

2.1 Définition

Une cavité résonnante (ou résonante), parfois appelée résonateur, est un espace creux à l'intérieur d'un solide dans lequel une onde entre en résonance.

2.2 Exemple en acoustique

Manip' qualitative en acoustique : diapason avec et sans caisse de résonance : amplification

Interprétation Établissement d'un système d'ondes stationnaires.

Une cavité résonnante en acoustique fonctionne de manière similaire à une cavité résonnante en optique, mais au lieu de manipuler la lumière, elle manipule les ondes sonores. Elle est utilisée pour amplifier certaines fréquences sonores et créer des résonances. Une cavité résonnante acoustique est généralement constituée d'une enceinte fermée avec des parois réfléchissantes. Ces parois peuvent être rigides ou flexibles, et elles sont souvent conçues de manière à réfléchir efficacement les ondes sonores à l'intérieur de la cavité. Lorsqu'une onde sonore est introduite dans la cavité, elle se réfléchit entre les parois de la cavité, créant ainsi des interférences constructives et destructives. Cela conduit à la formation d'ondes stationnaires à des fréquences spécifiques appelées modes de résonance. Les dimensions de la cavité, y compris sa taille et sa géométrie, déterminent les fréquences des modes de résonance. Les cavités résonnantes peuvent être conçues pour amplifier certaines fréquences et supprimer d'autres. Par exemple, une cavité de résonance conçue pour amplifier les basses fréquences aura des dimensions plus grandes.

Application en musique La plupart des instruments acoustiques emploient des résonateurs, tels que les cordes et le corps d'un violon, la longueur du tube d'une flûte, et la forme d'une membrane de tambour.

Les cavités résonnantes en acoustique sont utilisées dans plusieurs applications. Par exemple, les instruments à cordes, tels que les guitares et les violons, utilisent une cavité résonnante pour amplifier les vibrations des cordes et produire un son plus fort. Les enceintes acoustiques utilisent également des cavités résonnantes pour amplifier les fréquences sonores et améliorer la qualité sonore. En résumé, une cavité résonnante en acoustique fonctionne en permettant aux ondes sonores de se réfléchir entre les parois de la cavité, créant ainsi des ondes stationnaires de résonance à des fréquences spécifiques. Cela permet d'amplifier et de contrôler les fréquences sonores pour diverses applications acoustiques.

Exemple de la guitare Pour une guitare acoustique, les fréquences amplifiées dépendent principalement des caractéristiques de la caisse de résonance de l'instrument. La caisse de résonance de la guitare amplifie principalement les fréquences situées dans la plage des basses et des médiums.

Les basses fréquences amplifiées se situent généralement entre 80 Hz et 250 Hz. Ces fréquences correspondent aux notes les plus graves produites par les cordes de la guitare.

Les fréquences médiums amplifiées se situent généralement entre 250 Hz et 2000 Hz. C'est dans cette plage que se trouvent les harmoniques et les résonances caractéristiques de la guitare, donnant au son de l'instrument sa richesse et sa chaleur.

2.3 Exemple en optique

Expliquer la nécessité d'utiliser une cavité optique [Olive, Houard, Précis PC].

Lorsqu'une source de lumière est introduite dans la cavité, les miroirs réfléchissent la lumière en arrière et en avant entre eux. Cela crée des interférences entre les ondes réfléchies, ce qui conduit à la formation d'ondes stationnaires à des fréquences spécifiques appelées modes de résonance. Ces modes sont caractérisés par des nœuds (points où l'amplitude de l'onde est nulle) et des ventres (points où l'amplitude est maximale) fixes dans la cavité.

Dans un laser, le résonateur optique joue un rôle essentiel dans le processus d'amplification et de génération du faisceau laser cohérent. Bien que le milieu amplificateur puisse fournir l'amplification de la lumière, le résonateur optique permet d'obtenir une rétroaction positive et de maintenir la cohérence du faisceau laser. Le résonateur optique permet de sélectionner certaines longueurs d'onde spécifiques et de rejeter les autres. Cela est possible en ajustant la distance entre les miroirs réfléchissants pour créer une résonance constructive à une certaine longueur d'onde. Lorsque les photons de cette longueur d'onde particulière sont émis par émission stimulée, ils sont amplifiés à chaque passage entre les miroirs et renforcés par la rétroaction optique. Les autres longueurs d'onde qui ne satisfont pas aux conditions de résonance constructive sont rapidement atténuées. Cela permet d'obtenir une émission laser monochromatique.

2.4 Analogie avec la corde de Melde

[Chaigne, Sylvio] Tableau.

Une corde vibrante est un système mécanique où une corde tendue est mise en vibration, produisant des ondes sonores. Lorsque la corde est excitée, elle peut vibrer à différentes fréquences naturelles déterminées par sa longueur, sa tension et sa densité linéique. Ces fréquences naturelles sont appelées modes de résonance de la corde. Lorsque la corde vibre à l'une de ces fréquences, elle résonne et amplifie l'amplitude des vibrations.

De manière similaire, une cavité résonante est une structure qui peut emmagasiner et amplifier des ondes sonores. Elle peut être constituée d'un volume d'air ou d'un autre milieu avec des parois réfléchissantes. Lorsqu'une onde sonore entre dans la cavité, elle peut se réfléchir entre les parois, créant des interférences constructives. Si la fréquence de l'onde correspond à l'une des fréquences naturelles de résonance de la cavité, une amplification significative de l'amplitude de l'onde se produit. Cela se traduit par une augmentation de l'énergie sonore à cette fréquence spécifique.

Dans les deux cas, que ce soit une corde vibrante ou une cavité résonante, l'idée de résonance est centrale. Lorsque le système est excité à sa fréquence de résonance, une amplification de l'amplitude des vibrations ou de l'énergie sonore se produit. Les fréquences de résonance sont déterminées par les caractéristiques du système, telles que la longueur de la corde, la tension, la densité, ou les dimensions de la cavité. L'analogie réside dans le fait que les deux systèmes ont des fréquences naturelles de résonance et peuvent amplifier les vibrations ou les ondes sonores à ces fréquences spécifiques.

Conclusion

[Pérez]

Conclure sur l'importance de l'étude des résonance : soit pour les éviter, soit pour les exploiter.

Exemple d'applications (attention : il faut maîtriser les concepts) : RMN, résonance de spin électronique, résonateur confocal (laser).

A noter

- La résonance est une notion relative à des oscillations forcées, alors que les modes propres sont eux relatifs à des oscillations libres.

Description de l'expérience

Expérience

Matériel

- GBF GX320 Metrix
- Boîte à décades C : $C = 20nF$
- Boîte à décades R : $R = 20\Omega$
- SELF L : $L = 4.7mH$, $r = 12\Omega$
- Oscilloscope
- RLC-mètre
- Fils et câbles
- Chronomètre

Matériel manip' qualitative

- Diapason + caisse de résonance + truc pour frapper

Protocole

- ▷ Attention : il faut prendre en compte TOUTES LES RÉSISTANCES (i.e. celle de la bobine r et celle du GBF $R' = 50\Omega$)
- ▷ Mesurer tous les R , L et C .
- ▷ Faire le circuit (choisir le bon ordre selon qu'on mesure U_R ou U_C).
- ▷ Mettre en X le sweep (fréquence) (VGC IN Sweep out) et en Y U_R ou U_C .
- ▷ Mode XY, persistance, haute-résolution, etc.
- ▷ Déterminer la conversion tension/fréquence (soit mode normal, soit avec les pas $256 = 8\text{bits}$) : On code $2V$ et $f_i \rightarrow f_f$ sur Δt s/256 pas. $V = At$, $f = A't + B$. Puis on réinjecte pour avoir $f(V)$.

Aspect quantitatif : Mesure de $Q = \frac{f_0}{\Delta f}$ (valable pour U_R , et pour U_C sous condition que Q grand (i.e. > 5), et mesure de f_r/f_0 . Comparer au valeurs théoriques.

Manipulation qualitative : effet de changement des paramètres sur f_0 et sur la résonance Q pour U_C .

25

Oscillateurs ; portraits de phase et non-linéarités

Niveau : L2

Prérequis :

- Mécanique de 1ère année.
- Modèle du pendule simple.
- Oscillateur harmonique.

Bibliographie :

- A utiliser partout : Toute la mécanique MPSI-PCSI, MP-PC-PSI. Bocquet, Faroux, Renault. J'intègre DUNOD.
- Mécanique : fondements et applications. Pérez.
- BUP : https://uhincelin.pagesperso-orange.fr/LP49_BUP_portrait_phase_oscil.pdf
- Physique Sup PCPSI. Tec&Doc. Grécias, Migéon.
- Borda : https://bd2kstmm.files.wordpress.com/2020/06/lp49_oscillateurs_portraits_de_phase_1.pdf
- Simulation : <https://femto-physique.fr/simulations/simple-pendulum.php>

Introduction

Mettre des images de la vie de tous les jours (horloge, cœur qui bat, balançoire, etc.) → oscillateur.

1 Oscillateurs non-linéaires

1.1 Définition oscillateur

cf. Taillet.

On distingue oscillateurs linéaires et non linéaires.

1.2 Définition système (non) linéaire

Un système linéaire répond à une excitation proportionnellement à l'amplitude de celle-ci.

Un exemple d'oscillateur linéaire : l'OH : $\ddot{\theta} + \omega^2\theta = 0$. Résolution connue (sinus).

Un système non-linéaire ne répond pas linéairement. Il y a dès lors deux manifestations élémentaires, et parfaitement générales, de la non-linéarité d'un système :

- l'amplitude de la réponse n'est pas proportionnelle à celle de l'excitation ;
- si on l'excite sinusoïdalement à une fréquence f , il répond éventuellement à d'autres fréquences.

1.3 Exemple du pendule simple : mise en évidence de la non-linéarité

- Un exemple d'oscillateur non-linéaire : le pendule simple non-amorti.

$$\ddot{\theta} + \omega^2 \sin \theta = 0.$$

- Dérivation de la formule de Borda [Toute la méca].

https://bd2kstmm.files.wordpress.com/2020/06/lp49_oscillateurs_portraits_de_phase_1.pdf

Expérience

Formule de Borda, fit.

C'est bien un système non-linéaire. Résolution analytique compliquée : comment étudier ça ? -> un nouvel outil : le portrait de phase.

[Pérez] Il faut discuter les principaux effets non linéaires dans le cas des oscillateurs, à savoir, variation de la fréquence en fonction de l'amplitude et création d'harmoniques.

2 Portrait de phase

2.1 Définition

BUP

[Mécanique I, H-prépa]

Introduire les différentes notions (système, plan de phase, trajectoire, etc.)

2.2 Propriétés

- Déterminisme :
 - Deux trajectoires ne se coupent pas.
 - Trajectoires fermées = mouvements cycliques.
- Points fixes.
- Sens de parcours
- CI.
- Energie

C'est un outil très riche pour l'analyse de nombreux systèmes et en particulier des oscillateurs.

3 Application à différents oscillateurs

[Tec&Doc, H-prépa]

3.1 Oscillateur non-amorti

- Application sur le pendule non-amorti linéaire. Montrer l'acquisition.
- Application sur le pendule non-amorti non-linéaire. Montrer l'acquisition.
- Interprétation (le dessiner au tableau) : sens de lecture, conditions initiales.
- Finir l'illustration avec une animation : <https://femto-physique.fr/simulations/simple-pendulum.php>

[php](https://femto-physique.fr/simulations/simple-pendulum.php)

- Retrouver le régime linéaire pour les petits angles.

[Toute la méca] discuter les différents cas selon l'énergie (p. 452).

3.2 Oscillateur amorti

- Application sur le pendule non-amorti non-linéaire. Montrer l'acquisition.
- Interprétation (le dessiner au tableau) : sens de lecture, conditions initiales.
- Finir l'illustration avec une animation : <https://femto-physique.fr/simulations/simple-pendulum.php>

3.3 Oscillateur auto-entretenu

(Si le temps).

Définition

[BUP] Un système qui, tel une horloge, évolue indéfiniment de façon périodique doit recevoir de l'énergie pour compenser les phénomènes dissipatifs inévitables qui accompagnent son fonctionnement. Un tel système est appelé oscillateur entretenu.

Oscillateur de Van Der Pol

[Toute la méca]

Equa diff. Notion de cycle limite.

Compliqué à résoudre -> soit numérique soit approximation.

Portrait de phase

(numérique : Euler, Runge-Kutta, etc.) https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Meca/Oscillateurs/vdp_phase.php

Parler des bifurcations ?

Conclusion

Le portrait de phase est utile pour décrire le fonctionnement d'un système sans calculs lourd.

Description de l'expérience

Expérience

Matériel

- Pendule
- Masse
- Carte d'acquisition + câbles

Protocole

- ▷ Brancher et faire l'acquisition sur Latis Pro.

Aspect quantitatif : Mesure $T(\theta)$ sur Latis-Pro (faire une modélisation en cos puis mesures automatiques). Faire l'ajustement de la formule de Borda sur Qtiplot.

Tracer les portraits de phases dans le cas non dissipatif (avec masse) et dissipatif (sans masse).

26

Cinématique relativiste. Expérience de Michelson et Morley

Niveau : L3

Prérequis :

- Mécanique classique
- Électromagnétisme

Bibliographie :

- Introduction à la relativité. D. Langlois. Vuibert
- Introduction à la physique moderne : relativité et physique quantique. Claude Fabre, Charles Antoine, Nicolas Treps. Dunod.
- Relativité. M. Boratav et R. Kerner. ellipses.
- Relativité restreinte : bases et applications. Claude Semay. Dunod.
- Relativité : fondements et applications. Pérez.
- Cours Laurent : <http://supernovae.in2p3.fr/~llg/Enseignements/Agregation/Relativite/>

Notes agrégat + CR

- 2016 : Les notions d'événement et d'invariant sont incontournables dans cette leçon.
- 2015 : Le jury rappelle qu'il n'est pas forcément nécessaire de mettre en oeuvre des vitesses relativistes pour être capable de détecter et de mesurer des effets relativistes.
- 2014 : Cette leçon exige une grande rigueur dans l'exposé tant sur les notions fondamentales de relativité restreinte que sur les référentiels en jeu. Elle invite les candidats à faire preuve d'une grande pédagogie pour présenter des notions a priori non intuitives et faire ressortir les limites de l'approche classique. Un exposé clair des notions d'invariant relativiste est attendu.
- Karim : Préciser que les transformations de Lorentz viennent du fait que c est constante.

Introduction

[Fabre] Les lois qui régissent le mouvement des corps ont été pendant longtemps basées sur des évidences : temps universel, distance absolues.

Aujourd'hui, on sait que le temps, l'espace et le mouvement sont en fait des concepts plus subtils.

En effet, vers la fin du 19ème siècle, on a remis en cause ces postulats à travers des interrogations qui ont paradoxalement portés sur un autre domaine de la physique : l'électromagnétisme. Il s'en est suivi le développement d'une nouvelle théorie appelée « la relativité restreinte ». Cette dernière permet entre autre de répondre à des questions comme :

- Le tic-tac d’une horloge ou la longueur d’une règle sont-ils les mêmes partout ?
- La vitesse de la lumière dépend-elle du référentiel d’étude ?

Dans cette leçon, nous allons voir comment la relativité restreinte permet de répondre à ces questions. Mais avant cela, découvrons comment cette théorie est née.

1 De Galilée à Einstein

En mécanique classique, nous avons étudié les changements de référentiels galiléens, notamment la transformation de Galilée pour passer d’un référentiel galiléen à un autre. Nous avons vu en particulier la formule de composition des vitesses.

1.1 Mécanique classique

[ellipses, Langlois, Semay]

Universalité du temps Postulat de Newton. Possibilité de définir un temps identique $t = t'$ dans \mathcal{R} et \mathcal{R}' .

Principe de la relativité galiléenne Les lois de la physique sont invariantes par changement de référentiel galiléen (ou inertiel).

Transformations de Galilée [Semay, ellipses] \mathcal{R} et \mathcal{R}' en mouvement relatif, vitesse constante $v = v_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}}$.

$$\begin{aligned} r' &= r - vt \\ t' &= t. \end{aligned}$$

Implique la **loi de composition des vitesses** : $u' = u - v$.

En particulier : appliqué à la lumière : La mécanique classique prédit que la vitesse apparente d’un rayon lumineux doit changer selon le référentiel de l’observateur $c' = c - v$.

1.2 Incompatibilité avec l’électromagnétisme

[ellipses]

Cependant en 1865, Maxwell publie sa théorie de l’électromagnétisme. Le problème : les équations de Maxwell ne sont pas invariantes sous la transformation de Galilée : montrer **sur slide** un exemple d’une équation de Maxwell (ex : MF) ou de l’équation de d’Alembert dans un réf \mathcal{R} et ce que ça donne dans un réf \mathcal{R}' sans faire le calcul (**mais savoir le faire pour les questions**).

Trois solutions

1. Maxwell a faux
2. Rendre Maxwell et Galilée compatibles
3. La méca classique est fautive

(1) improbable. (3) euh.. pas tout de suite quand même. (2) On tente des choses \rightarrow l’éther.

Éther

Référentiel privilégié servant de support à la propagation des OE (comme l’atmosphère pour les ondes acoustiques) et dans lequel les équations de Maxwell sont valables.

1.3 Expérience de Michelson et Morley

[Langlois]

Michelson et Morley (1881, puis 1887, souvent répétée et améliorée depuis). Nécéssité d'un interféromètre pour mesurer précisément des différences de trajets optiques. Dire qu'il faut mesurer la différence de temps de trajet aller-retour entre les deux bras.

Description

Analogie avec deux nageuses https://www.youtube.com/watch?v=6_hyWb8TEEQ

Calcul avec le Michelson Faire le schéma (lame d'air). c : vitesse de la lumière par rapport à l'éther. $u = 30$ km/s : vitesse de la terre par rapport à l'éther. v : vitesse de la lumière par rapport à la Terre.

$$v_{lum/Ether} = v_{lum/Therre} + u. \quad (1.1)$$

Faire le calcul de la durée du trajet aller-retour.

Animation : https://www.youtube.com/watch?v=6_hyWb8TEEQ

Bras \parallel En norme : aller $v = c + u$, retour $v = c - u$.

$$t_{\parallel} = \frac{d}{c+u} + \frac{d}{c-u} = \frac{2d}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right) + o\left(\frac{v^2}{c^2}\right) \quad (1.2)$$

Bras \perp En norme : Animation + faire le schéma. Pythagore donne $c^2 = v^2 + u^2$. D'où une vitesse à l'aller et au retour de $v = \sqrt{c^2 - u^2}$.

$$t_{\perp} = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - u^2}} = \frac{d}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right) + o\left(\frac{v^2}{c^2}\right) \quad (1.3)$$

Différence de temps de parcours A l'ordre 2 : $\Delta t = t_{\parallel} - t_{\perp} = \frac{d}{c} \frac{v^2}{c^2}$. Donne un déphasage $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}$ et une différence de marche $\delta = c\Delta t = \frac{dv^2}{c^2}$.

Ordre d'interférence $p = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{dv^2}{c^2}$.

A.N. : $u = 30\text{km/s}$, $c = 310^8\text{m/s}$, $d = 10\text{m}$, $\lambda = 500\text{nm}$ donne $p = 0.2$ franges \rightarrow parfaitement observable!

L'appareil n'étant pas parfait, on ne peut assurer que la distance entre la lame séparatrice et le miroir soit parfaitement égale dans les deux directions, et de ce fait l'apparition de franges ne permet pas de conclure directement. En revanche, on peut faire la différence entre les franges dues à l'appareil, et celles dues au phénomène qu'on veut mettre en évidence : il suffit pour cela de faire tourner l'appareil d'un quart de tour pour intervertir les deux trajets, et d'observer si les franges se modifient.

Ils ont donc fait une rotation de 90° des bras. On devrait observer un décalage de la figure d'interférence mais ils n'ont rien vu. CCL : « s'il y a un mouvement relatif entre la Terre et l'éther luminifère, il doit être petit ». « The expected deviation of the interference fringes from the zero should have been 0.40 of a fringe – the maximum displacement was 0.02 and the average much less than 0.01 – and then not in the right place. »

N.B. Comme on ne sait pas a priori quelle est la vitesse de la Terre par rapport à l'éther, ni même si l'on n'est pas, par hasard, dans un endroit et à un moment où sa vitesse est nulle, il faut refaire l'expérience dans plusieurs directions, et avec plusieurs mois d'écart pour profiter du fait que la vitesse de la Terre par rapport à l'éther est modifiée.

N.B [Pérez] Depuis, on a refait l'expérience plein de fois, de plus en plus précise, mais pareil. En octobre 2003, précision relative de 2.610^{-15} .

CCL

Pas d'éther, invariance de la vitesse de la lumière dans le vide \rightarrow Solution 3 : la méca classique est fausse.

Il faut construire une nouvelle cinématique en accord avec la théorie de Maxwell : cette nouvelle construction de la cinématique est la relativité restreinte.

1.4 Postulat d'Einstein

Plusieurs physiciens théoriciens (Lorentz, Poincaré) proposent des solutions formelles ad hoc pour réconcilier mécanique classique et électromagnétisme, sans toutefois en tirer toutes les conséquences physiques.

[Langlois]

En 1905, Einstein va construire une nouvelle cinématique en s'appuyant sur deux postulats

- Toutes les lois de la physique (y compris EM) sont les mêmes dans tous les référentiels galiléens.
- La vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels : la vitesse de la lumière c est **invariante** par changement de référentiel.

À partir de ces postulats, on trouve les nouvelles équations de changement de référentiel (formulées par Lorentz et Poincaré), et on construit un nouvel ensemble de lois mécaniques baptisé relativité restreinte (special relativity).

Transition Comme on l'a vu, les postulats sont en contradiction avec la loi de composition de vitesse de Galilée. Il faut donc changer les lois de transformation d'un référentiel galiléen vers un autre.

2 Description relativité restreinte

2.1 Événement

[Fabre, p.11]

Phénomène physique bien localisé à la fois dans l'espace et le temps. Donner des exemples (émission d'un signal lumineux, collision entre deux particules, etc.). On lui associe pour un référentiel donné 4 nombres : t, x, y, z . Pas nécessairement les mêmes pour un autre référentiel.

Transition Comment passer de l'un à l'autre ?

2.2 Transformation de Lorentz spéciale

Transformation vérifiant ces deux principes, pour deux référentiels en translation rectiligne uniforme l'un par rapport à l'autre.

N.B. (ne pas forcément en parler, mais l'avoir en tête) En première approche, ces deux postulats + homogénéité de l'espace-temps + isotropie de l'espace mène vers l'invariance de la norme au carré de l'intervalle d'espace-temps $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2$. Les transformations vérifiant cette invariance sont les transformations de Lorentz.

[Langlois]

Poser le cadre (même origine, mouvement relatif de l'axe x' parallèle à l'axe x , etc.). **Avoir une idée de comment on les dérive.** Transformations (spéciales) de Lorentz :

$$ct' = \gamma(ct - \beta x)$$

$$x' = \gamma(x - \beta ct)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Remarquer que la transformation réciproque est simplement obtenue en inversant le sens de la vitesse

N.B. Il y a une forme plus générale (axe quelconque).

3 Conséquences sur la cinématique

[Langlois]

Les transformations de Lorentz ont de nombreuses conséquences pratiques assez surprenantes et contre-intuitives. Le temps n'est plus universel : il s'écoule différemment selon le référentiel considéré. Le concept de simultanéité devient relatif. La synchronisation des horloges dans un référentiel donné nécessite d'élaborer un protocole d'échanges de signaux lumineux (car c est constante et universelle).

3.1 Perte de la simultanéité

3.2 Dilatation du temps

Temps propre. Pour un observateur, le temps $\Delta\tau$ mesuré dans le référentiel qui lui est attaché semble toujours s'écouler plus lentement que dans tout autre référentiel $\Delta t = \gamma\Delta\tau > \Delta\tau$.

Calculer $\frac{\tau}{\tau_p}$ à comparer avec γ .

Expérience de Frisch et Smith

[Pérez, p. 46]

Introduire le Muon. Instabilité (désintégration) $\mu \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$. Loi de désintégration $N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$. Temps moyen de désintégration **au repos** $\tau_p = 2.198 \pm 0.02 \mu s$. Vitesse $0.992c$. Mesure du flux (muons par heure) en haut et en bas de la montagne. t_1 et t_2 instants de détection, $\ln \frac{n_2}{n_1} = -\frac{t_2 - t_1}{\tau}$. En déduire τ . Interpréter la différence avec le temps propre : il faut prendre en compte les deux référentiels (Muon et terrestre, pas pareil). **Faire les calculs dans un tableur ou sur Jupyter par exemple. Prendre en compte les incertitudes. cf. [http://supernovae.in2p3.fr/~llg/Enseignements/Agregation/Relativite/biblio/Frisch-et-Smith--1963--Measurement-of-the-Mean-Life-of-the-Muon.pdf](http://supernovae.in2p3.fr/~llg/Enseignements/Agregation/Relativite/biblio/Frisch-et-Smith--1963--Measurement-of-the-Mean-Life-of-the-Muon)**

Parler de l'expérience récente du CERN qui donne une super valeur [Pérez].

3.3 Contraction des longueur

Exemple théorique élémentaire (position des extrémités d'un objet, immobile dans un référentiel et en mouvement dans l'autre). Un diagramme d'espace-temps peut aider. Si vous voulez illustrer l'effet de contraction des distance expérimentalement, vous pouvez évoquer l'interprétation du résultat de l'expérience de Frisch et Smith dans le référentiel propre des muons : du point de vue d'un muon, sa vie moyenne dure bien $2.2 \mu s$ dans son référentiel, mais la hauteur parcourue dans l'atmosphère est par contre contractée (contraction de FitzGerald-Lorentz), du même facteur $\gamma(v)$.

3.4 Composition des vitesses

On pourrait s'attendre à voir traitée la loi relativiste de composition des vitesses, avec une comparaison avec son équivalent classique.

Expérience de Fizeau

3.5 Intervalle d'espace-temps

Invariance.

Bonus

- Diagrammes de Minkowski
- Intervalle d'espace-temps

Conclusion

La théorie de la relativité est une réalité, on peut mesurer ses effets expérimentalement, même pour de petites vitesses comme le montre l'expérience de Fizeau. Ces effets sont à prendre en compte (GPS). Parler aussi des horloges en mouvement [Fabre, p.51].

27

Effet tunnel : application à la radioactivité alpha

Niveau : PC

Prérequis :

- Physique ondulatoire
- Notion de mécanique quantique (Schrödinger indépendante du temps, courant de probabilité, puits de potentiel de profondeur fini afin de déjà avoir la notion d'onde évanescence)
- Notions de lycée sur la radioactivité

Bibliographie :

- Introduction à la physique quantique. Jean-Louis Basdevant. De Boeck Supérieur.
- Physique quantique : Tome 1, Fondements. M. Le Bellac. EDP Sciences.
- Quantique : fondements et applications. Pérez.
- Tout-en-un PC. Sanz.
- Les nouveaux précis Physique PC. Bréal. Tisserand, Brendals et al.

Notes agrégat

- 2017 : Encore une fois, il ne s'agit pas de se limiter à des calculs. L'exposé doit présenter l'analyse d'applications pertinentes.
- 2015 : Trop de candidats pensent que l'effet tunnel est spécifique à la physique quantique.
- 2013, 2012, 2011 : Dans le traitement de l'effet tunnel, les candidats perdent souvent trop de temps dans les calculs. Le jury invite les candidats à réfléchir à une présentation à la fois complète et concise sans oublier les commentaires physiques relatifs à la dérivation de la probabilité de transmission. Certains candidats choisissent d'aborder le cas de la désintégration alpha mais ne détaillent malheureusement pas le lien entre la probabilité de traversée d'une barrière et la durée de demi-vie de l'élément considéré. La justification des conditions aux limites est essentielle ! Le microscope à effet tunnel peut être un bon exemple d'application s'il est analysé avec soin (hauteur de la barrière, origine de la résolution transverse, ...).

Introduction

[Karim]

Les lois de la physique quantique sont très différentes de celles de la physique classique. De nombreux phénomènes contre-intuitifs : dualité onde-particule, relations d'incertitude, ubiquité d'une particule.

L'effet tunnel est une conséquence de la dualité.

Présentation rapide de l'effet tunnel [Bellac, p. 32]. Deux situation : pour un puit de potentiel. En classique :

— Puit : $E > 0$: diffusion. $V_0 < E < 0$: état lié.

En méca Q : la particule peut franchir la barrière même si $E < V_0$: c'est l'**effet tunnel**.

N.B. En méca classique : E est continue dans lié et diffusion. En quantique : E est discrète en lié et continue en diffusion.

N.B. En quantique : une particule peut rebondir sur une barrière même si $E > V_0$.

1 Position du problème

Dans la suite, on se restreint à un pb à 1d.

[Basdevant]

1.1 Méthodologie

Hamiltonien $H = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + V(\mathbf{r})$. Conservation de l'énergie : on se ramène à $\psi = \phi(\mathbf{r})e^{-Et/\hbar}$ et au problème aux valeurs propres $H\phi = E\phi$.

1.2 États liés et états de diffusion

États liés

Potentiel confinant, fonction d'onde vérifie l'équation aux valeurs propres et est normalisable. On montre mathématiquement que l'ensemble $\{\phi_n, E_n\}$ est discret. Etat lié général = superposition d'états liés stationnaires.

États de diffusion

Potentiel non confinant. Il existe des solutions de l'équation aux valeurs pour un ensemble **continu** d'énergies **SI** la fonction d'onde est non-normalisable. Ces solutions correspondent aux états de diffusion. Pas de pb physique car leurs superpositions, elles, sont normalisables : ce sont des paquets d'onde qui se déplacent dans l'espace.

c'est à ces que l'on va s'intéresser dans la suite.

1.3 Cas de la barrière de potentiel

Pour simplifier les calculs, nous modélisons les potentiels réels par formes simplifiées pouvant comporter des discontinuités. Prix à payer : il faut imposer à ψ et à ψ' des conditions de continuité (conséquence directe de l'équation $-\frac{\hbar^2}{2m}\psi''(x) + V(x)\psi(x) = E\psi(x)$).

Faire le schéma. 3 zones : I, II et III. On choisit $E < V_0$. On méca classique, la particule rebondit. On va voir ce qui se passe pour la particule quantique.

2 Effet tunnel

2.1 Résolution

[Sanz]

— Régions I et III : $\varphi'' + k^2\varphi = 0$

— Région II : $\varphi'' - q^2\varphi = 0$

avec $k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$ et $q = \frac{\sqrt{2m(V_0-E)}}{\hbar}$.

1. Écrire les solutions dans les 3 régions. 6 inconnues.
2. Discuter l'interprétation physique dans chaque zone (I : incidente + réfléchie ; III : transmise, pas d'incidente de l'autre côté : $B_3 = 0$; II : superposition de deux ondes évanescentes). 5 inconnues.
3. 4 conditions de continuité sur φ et φ' . 1 inconnue. On peut exprimer A_1 en fonction de toutes les autres : pas de quantification.

2.2 Coefficients de réflexion et de transmission

[Bréal, p. 731 et p. 754 ou encore Pérez]

On écrit les équations issues des conditions de continuité où on a introduit

$$\begin{aligned} r &= \frac{B_1}{A_1} \\ t &= \frac{A_3}{A_1} \\ x &= \frac{A_2}{A_1} \\ y &= \frac{B_2}{A_1} \end{aligned}$$

— Calcul formel : https://www.wolframalpha.com/input?i=1+%2Br+%3D+x+%2By+%2C+i*k*%281+-+r%29+%3D+q*%28x+-+y%29+%2C+x*exp%28q*a%29+%2By*exp%28-q*a%29+%3D+t*exp%28i*k*a%29%2C+q*%28x*exp%28q*a%29+-+y*exp%28-q*a%29%29+%3D+i*k*t*exp%28i*k*a%29

— Entrer : $1 + r = x + y$, $i*k*(1 - r) = q*(x - y)$, $x*exp(q*a) + y*exp(-q*a) = t*exp(i*k*a)$, $q*(x*exp(q*a) - y*exp(-q*a)) = i*k*t*exp(i*k*a)$.

— Appuyer sur l'expression de t dans un nouvel onglet.

— Prendre l'expression simplifiée de t faisant intervenir sh et ch et la simplifier au tableau pour retrouver l'expression du Pérez.

— Idem pour r .

On écrit les courants de probabilité associés ($j(x, t) = \frac{\hbar}{2mi} Re[\psi^*(x, t) \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial x}]$). On calcule R et T comme la norme au carré de r et t . Faire le calcul au tableau pour t et retrouver l'expression du DUNOD. Balancer R .

Discuter :

— $T \neq 0$: effet tunnel.

— $R + T = 1$: conservation de l'énergie.

Jouer sur la simulation <https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/quantum-tunneling/latest/quantum-tunneling.html?simulation=quantum-tunneling>

2.3 Cas de la barrière épaisse

[Sanz]

3 Application à la radioactivité α

[Sanz]

3.1 Approche expérimentale

Rappel de la définition. Constatation expérimentale de la radioactivité alpha : la demi-vie de la particule alpha est d'autant plus courte que l'énergie cinétique de la particule est grande.

Transition nous allons expliquer ces temps de vie grâce au phénomène de l'effet tunnel.

3.2 Modèle de Gamow, Gurney et Condon

1928. Gamow et, de façon concomitante et indépendante, Gurney et Condon.

Afin de décrire ces phénomènes on adopte un modèle. On suppose que la particule alpha existe à l'intérieur du noyau. Elle est soumise à E_p . Tracer la forme du potentiel : c'est un puit.

3.3 Probabilité de transmission

[JF] On reprend l'expression du coefficient de transmission de la barrière. On approxime la barrière variant continuellement par plusieurs barrières rectangulaires. Le coefficient de transmission global est le produit des coefficients de transmission. On obtient $\ln T$ [Sanz].

Eventuellement utiliser <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/alphdec.html>

Conclusion

Slide : autre application, la microscopie à effet tunnel [Sanz]. Montrer <https://www.youtube.com/watch?v=DC0U5viudt0> ou <https://www.youtube.com/watch?v=NEsbREz-BBU>

Si le temps, finir sur <https://www.slate.fr/life/71883/ibm-produit-la-premiere-video-atomique>