

Table des matières

I Leçons de physique	15
1 Gravitation	20
I Interaction gravitationnelle	21
I.1 Force de gravitation	21
I.2 Analogie avec le champ électrostatique (sur slide)	21
I.3 Champ gravitationnel d'une boule homogène	22
II Dynamique terrestre (10'35)	22
II.1 Caractère non galiléen terrestre	22
II.2 Mesure du champ de pesanteur à la latitude 48.8 N (19'30) . .	23
III Effets de marées (33'20)	23
2 Lois de conservation en mécanique	28
I Conservation de la quantité de mouvement	29
I.1 Système isolé	29
I.2 Système pseudo-isolé	30
I.3 Collision élastique	30
II Conservation de l'énergie	30
II.1 Forces conservatives	30
III Conservation du moment cinétique	30
III.1 TMC	30
III.2 Système pseudo-isolé	30
III.3 Cas d'une force centrale	30
3 Notions de viscosité d'un fluide. Ecoulement visqueux.	32
I Notion de viscosité	33
I.1 Viscosité de cisaillement	33
I.2 Équivalent volumique de la force de viscosité	34
II Dynamique d'un fluide visqueux	35
II.1 Équation de Navier-Stokes et nombre de Reynolds	35
II.2 Viscosimètre à chute de bille : force de Stokes	36

II.3	Notion de couche limite	37
II.4	Transport diffusif de la quantité de mouvement	37
II.5	Aspect énergétique	37
II.6	Conditions aux limites cinématiques et dynamiques	37
4	Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide	38
I	Modèle de l'écoulement parfait	39
I.1	Equation d'Euler	39
I.2	Conséquence : effet de la courbure des lignes de courant	40
I.3	Théorème de Bernouilli	40
II	Applications	40
II.1	Les sondes Pitot	40
II.2	Mesure de la masse volumique de l'air	41
II.3	Effet Venturi	42
5	Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides	43
I	Tension superficielle	45
I.1	Origine microscopique	45
I.2	Définition	45
I.3	Force capillaire	46
II	Pression et tension de surface	47
II.1	Loi de Laplace	47
II.2	Mesure de $\gamma_{\text{savon-air}}$	48
II.3	Cas général (cette partie peut sauter)	48
III	Influence de la gravité	49
III.1	Nombre de Bond	50
III.2	Ascension capillaire dans un tube	51
IV	Effet de mouillage	52
6	Premier principe de la thermodynamique	55
I	Premier principe de la thermodynamique	56
I.1	Enoncé	56
I.2	Travaux des forces de pression (11min30)	57
I.3	Exemples de bilan d'énergie	57
II	Applications du premier principe (20min)	58
II.1	Définitions préliminaires	58
II.2	Calorimétrie (24min)	58
II.3	Détente de Joule - Gay Lussac (38min)	58
7	Transition de phase	62

I	Description de la transition liquide-vapeur	63
I.1	Diagrammes de phase (P,T) et (P,V)	63
I.2	Enthalpie libre d'un corps pur sous deux phases	64
I.3	Chaleur latente liquide-gaz	64
II	Modèle de Landau pour la transition ferro-paramagnétique	65
II.1	Description de la transition	65
II.2	Enthalpie libre associée	66
II.3	Evolution de grandeurs thermodynamiques	66
8	Phénomènes de transport	67
I	Equilibre thermodynamique local (max 10min)	68
I.1	Système hors équilibre	68
I.2	Equilibre thermodynamique local	69
I.3	Flux et courants	69
II	Diffusion de particules	69
II.1	Loi de conservation	69
II.2	Loi de Fick (1855)	70
II.3	Equation de diffusion	70
II.4	Mesures du coefficient de diffusion eau-glycérol	70
II.5	Interprétation microscopique de la diffusion de particule (bonus)	71
III	Correspondance avec d'autres phénomènes de diffusion	71
9	Conversion de puissance électromécanique	72
I	Principe de la conversion	73
I.1	Exemple du rail de Laplace	73
I.2	Bilan de puissance	73
I.3	Interprétation	74
II	Moteur à courant continu	74
II.1	Structure	74
II.2	Etude du MCC	75
II.3	Bilan de puissance	75
III	Machines synchrones	76
III.1	Génération d'un champ magnétique tournant (bonus?)	76
III.2	Champ rotorique et champ statorique	76
III.3	Point de fonctionnement et stabilité	76
10	Induction électromagnétique	77
I	Phénoménologie de l'induction	78
I.1	Mise en évidence expérimentale	78

I.2	Loi de Faraday et loi de modération de Lenz	79
II	Théorie de l'induction	79
II.1	Définition formelle de la fem	80
II.2	Induction de Neumann	80
II.3	Induction de Lorentz	80
III	Aspects pratiques	81
III.1	Auto-induction	82
III.2	Inductance mutuelle	82
11 Rétroactions et oscillations.		87
I	Notion de rétroaction : commande d'un système	88
I.1	Système bouclé	88
I.2	Exemple : ALI non inverseur	89
I.3	Caractéristiques d'un asservissement	89
II	Stabilité des systèmes	90
II.1	Cas des systèmes d'ordre 1 et 2	90
II.2	Cas des systèmes bouclés	90
III	Oscillateurs électroniques	91
III.1	Oscillateur à Pont de Wien	91
12 Traitement d'un signal. Etude spectrale.		92
I	Spectre et filtrage d'un signal	94
I.1	Décomposition Fourier	94
I.2	Types de signaux	94
I.3	Réponse d'un filtre à une excitation périodique : exemple du filtre RC passe-bas	94
I.4	Autres types de filtre	94
II	Modulation et démodulation en amplitude	94
II.1	Principe de la modulation en amplitude	95
II.2	Démodulation par détection synchrone	95
III	Quelques aspects du traitement des signaux numérique	96
III.1	Echantillonnage	96
III.2	Effet du fenêtrage temporel	96
13 Ondes progressives, ondes stationnaires.		97
I	Approches du phénomène de propagation	98
I.1	Elongation d'une corde sans raideur	98
I.2	Analogie électrocinétique : le câble coaxial	98
II	Ondes progressives	99

II.1	Solution de l'équation de d'Alembert unidimensionnelle	99
II.2	Interprétation	99
II.3	OPPH	100
III	Onde stationnaire	100
III.1	Corde de Melde	100
IV	Conclusion	100
14 Ondes acoustiques.		101
I	Description des ondes acoustiques	102
I.1	Approximation acoustique	102
I.2	Equation de propagation du son	103
I.3	Mesure de la vitesse des ondes ultrasonores	105
II	Aspect énergétique	105
15 Propagation guidée des ondes.		106
I	Phénoménologie du guidage	107
I.1	Modèle de la fibre optique	107
I.2	Caractéristiques du guidage	108
II	Propagation d'une onde centimétrique dans un guide	108
II.1	Modélisation idéalisée du guide plan	109
II.2	Relation de dispersion des ondes TE dans le guide	110
II.3	Relation de dispersion du mode TE_1 dans le guide rectangulaire	111
II.4	Vitesse de phase et vitesse de groupe	112
III	Aspect expérimental du guide d'onde	112
16 Microscopies optiques		113
I	Le principe du microscope	114
I.1	Présentation du dispositif	114
I.2	Grossissement commercial	114
I.3	Eclairage de Köhler	115
II	Limitations (trouver mieux pour le nom)	116
II.1	Résolution latérale : critère de Rayleigh	116
II.2	Profondeur de champ	116
II.3	Aberrations (partie qui peut sauter)	116
III	Microscopie à contraste de phase	116
III.1	Principe	116
17 Interférences à deux ondes en optique		117
I	Interférences à deux ondes	118
I.1	Superposition de deux ondes	118

I.2	Conditions d'interférence, notion de cohérence	118
II	Exemple d'interféromètre : les trous d'Young	119
III	Effet de largeur de la source : cohérence spatiale	119
III.1	Présentation du problème	119
III.2	Cône de cohérence	120
IV	Conclusion	120
18	Interférométrie à division d'amplitude	122
I	Division d'amplitude	124
I.1	Théorème de localisation	124
I.2	Lame d'air	124
II	Interféromètre de Michelson	125
II.1	Présentation du montage en configuration lame d'air	125
II.2	Mesure interférométrique du doublet du sodium	126
19	Diffraction de Fraunhofer.	131
I	Conditions de Fraunhofer de la diffraction	132
I.1	Principe d'Huygens-Fresnel	132
I.2	Amplitude d'une onde à travers un diaphragme plan	132
I.3	Conditions et approximations de Fraunhofer	132
II	Deux exemples de systèmes diffractants	133
II.1	Diffraction par une fente	133
II.2	Diffraction par un trou d'Young	134
II.3	Ensemble de structure diffractante (peut sauter si besoin, ou en ouverture)	134
III	Applications de la diffraction	134
IV	135
20	Diffraction sur des structures périodiques	136
I	Diffraction par un réseau	137
I.1	Définition	137
I.2	Formule fondamentale du réseau	138
I.3	Mesure des raies spectrales de la lampe à vapeur de mercure . .	139
II	Facteur de structure et facteur de forme d'un réseau	140
II.1	Interférences à N ondes	140
II.2	Facteur de forme	140
III	Application : diffraction des solides cristallins	140
III.1	Conditions de diffraction de Bragg	140
21	Absorbtion et émission de la lumière	142

I	Absorption et émission spontanée	143
I.1	Spectre d'émission d'un atome	143
I.2	Mesure spectroscopique du spectre d'émission du mercure Hg .	144
I.3	Mise en évidence expérimentale de l'absorption	144
II	Modèle d'Einstein	145
II.1	Probabilités de transition	145
II.2	Relations entre les coefficients d'Einstein	145
II.3	Processus de transfert d'énergie	146
III	Application au laser	146
III.1	Principe	146
III.2	Modèle à 4 niveaux d'énergie : le laser de TP He-Ne	146
22 Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques		147
I	Aimantation d'un corps ferromagnétique (1min15)	148
I.1	Magnétostatique dans un milieu aimanté	148
I.2	Courbe de première aimantation (7min10)	148
I.3	Interprétation microscopique (9min12)	149
II	Cycle d'hystérésis (14min)	149
II.1	Etude du noyau de fer d'un transformateur(15min)	149
II.2	Bilan de puissance (35min38)	150
23 Mécanismes de la conduction électrique dans les solides		153
I	Approche microscopique classique	154
I.1	Modèle de Drude (1902) 10min max	154
I.2	Mise en défaut pratique du modèle de Drude	155
II	Modèle quantique des électrons libres	155
II.1	Modèle des électrons libres	155
III	Théorie des bandes	155
III.1	Electrons dans un potentiel périodique	155
III.2	Bandes d'énergie	156
III.3	Remplissage des bandes	156
III.4	Conductivité dans un semi-conducteur	156
IV	Conclusion	156
24 Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique		157
I	Oscillateurs harmoniques forcés	158
I.1	Résonance en vitesse en régime forcé	158
I.2	Equivalent électrocinétique	158
II	Oscillateurs couplés	158

III	Cavité résonante	159
III.1	Cavité Fabry Pérot	159
III.2	Intensité transmise	159
III.3	Finesse	159
25	Oscillateurs ; portraits de phase et non-linéarités.	160
I	Oscillateurs harmoniques	161
I.1	Equation du mouvement d'un pendule pesant	161
I.2	Portrait de phase	162
II	Effets non linéaires	163
II.1	Etude des effets non linéaires du pendule pesant	163
II.2	Portrait de phase de l'oscillateur anharmonique	163
II.3	Approche énergétique (peut sauter)	163
III	Oscillateurs amortis et amplifié	163
III.1	Oscillateurs amortis	163
III.2	Oscillateurs entretenus : exemple du pont de Wien	164
26	Cinématique relativiste. Expérience de Michelson et Morlay	165
I	Emergence de la relativité restreinte	166
I.1	Retour sur le postulat de la mécanique classique	166
I.2	Expérience de Michelson et Morlay	167
I.3	Postulat d'Einstein	167
II	Changement de référentiel relativiste	168
II.1	Evènements	168
II.2	Transformation de Lorentz	168
II.3	Intervalle d'espace-temps	169
III	Conséquences physiques	169
III.1	Dilatation du temps	169
III.2	Contraction des longueurs	169
27	Effet tunnel. Application à la radioactivité alpha.	170
I	Etats liés vs états de diffusion	172
I.1	Fonction d'onde et équation de Schrodinger	172
I.2	Courant de probabilité	172
II	Effet tunnel : transmission	173
II.1	Le puit carré modèle intégrable de la barrière de potentiel	173
II.2	Coefficients de réflexion et transmission	173
II.3	Approximation de la barrière épaisse	173
III	Application à la radioactivité alpha	174

III.1	Désintégration alpha	174
III.2	Modèle de Gamow	174
III.3	Loi de Geiger-Nutall	174
II	Leçons de chimie	175
28	L'eau, propriétés physiques et chimiques	184
I	Electronégativité	185
I.1	Liaison polarisée	185
I.2	La liaison hydrogène	186
II	Propriétés chimiques de l'eau	186
29	Contrôle qualité de l'eau et de l'air	187
I	Contrôle qualité de l'eau	188
I.1	Intérêt du contrôle de qualité	188
I.2	Solubilité des ions et de la conductivité	188
I.3	Dosage conductimétrique pour déterminer la teneur en sulfate .	188
II	Contrôle de la qualité de l'air	189
II.1	Composition de l'air	189
II.2	Combustion d'une bougie	189
30	Solubilité	190
I	Solubilité et produit de solubilité	192
I.1	Solubilité	192
I.2	Produit de solubilité	192
II	Quotient de réaction	192
III	Facteurs influençant sur la solubilité	192
III.1	Le pH	192
III.2	Température	193
IV	Conclusion	193
31	Distillation	197
I	Mélanges binaires homogènes	198
I.1	Mélange binaire	198
I.2	Fraction molaire	198
I.3	Fraction massique	198
II	Diagrammes binaires	199
II.1	Diagramme liquide-vapeur isobare	199
II.2	Courbes d'analyse thermique	199

II.3	Azéotrope	199
II.4	Exploitation	199
III	Application à la distillation	200
III.1	Distillation simple	200
III.2	Distillation fractionnée	200
32	Stéréochimie de configuration	205
I	Chiralité : propriétés chimiques	207
I.1	Stéréoisomères de configuration	207
I.2	Mélange racémique	207
II	Chiralité : propriétés physiques	207
II.1	Loi de Biot	207
II.2	Excès énantiomérique	207
III	208
III.1	208
IV	Conclusion	208
33	Electrolyse - électrosynthèse	209
I	L'électrolyseur	210
I.1	Principe	210
I.2	Equations aux électrodes	210
II	Bilan de matière sur un électrolyseur	211
II.1	Conservation de l'électricité	211
II.2	Rendement de l'électrolyse	211
III	Application : purification	212
34	Oxydoréduction	213
I	Oxydants et réducteurs (5min)	214
I.1	Définitions	214
I.2	Couple oxydant-réducteur	214
II	Réaction d'oxydoréduction (5min)	215
II.1	Définition	215
II.2	Réactions en milieu acide/basique	215
III	Potentiel d'un couple redox (5-10min)	215
III.1	Principe de la mesure : retour sur la pile	215
III.2	Potentiel standard d'un couple redox	216
III.3	Relation de Nernst	216
IV	Titrage d'oxydo-réduction	216
35	Conductimétrie	217

I	Conductance et conductivité	218
I.1	Définitions	218
I.2	Présentation du condcutimètre	219
I.3	Facteurs d'influence de la conductivité (16')	219
I.4	Loi de Kohlrausch (19')	219
II	Application : titrage par précipitation (24'50)	219
II.1	Analyse qualitative	220
II.2	Détermination de la concentration en ions chlorure dans le serum physiologique	220
III	Conclusion	220
36 Cinétique électrochimique		228
I	Réaction électrochimique	229
I.1	Description	229
I.2	Facteur cinétique	229
I.3	Intensité et vitesse de réaction	230
II	Courbe intensité-potentiel	230
II.1	Montage à 3 électrodes	230
II.2	Limitation de la cinétique	230
II.3	Système lent (34')	231
II.4	Système rapide (40')	231
III	Conclusion	231
37 Diagrammes E-pH		232
I	Lecture d'un diagramme E-pH	233
I.1	233
I.2	Calculs des équations aux frontières	233
II	Utilisation d'un diagramme potentiel pH	233
II.1	Diagramme potentiel-pH de l'eau	233
III	Utilisation d'un diagramme E-pH à des fins expérimentales	233
III.1	Procédé industriel à l'aide d'un diagramme E-pH	233
IV	Conclusion	233
38 Synthèse, traitement et caractérisations		236
I	Synthèse en chimie organique	237
I.1	Qu'est-ce-qu'une synthèse ?	237
I.2	La transformation chimique	238
II	Extraction du produit du mélange réactionnel	238
II.1	Cas où l'espèce est un liquide	238

II.2	Cas où l'espèce est un solide	238
II.3	Cas où l'espèce est un soluté	238
III	Efficacité de la synthèse	239
III.1	Identification du produit	239
III.2	Purification	239
39 Biomolécules et énergie		240
I	Les biomolécules pour l'organisme	241
I.1	Les biomolécules comme sources d'énergie	241
I.2	Exemple des glucides	241
II	Transformation biochimique dans l'organisme	242
II.1	La réaction d'hydrolyse	242
II.2	Transformation du glucose et production d'énergie	242
III	Conclusion	243
40 Gestion des risques en laboratoire de chimie		244
I	Manipuler en sécurité	245
I.1	Les bons gestes	245
I.2	Savoir lire les signes	245
II	Sécurité des produits acides et basiques	245
II.1	Couple acide/base	245
II.2	pH et concentration	246
II.3	Neutralisation	246
III	Sécurité des produits oxydants et réducteurs	246
III.1	Couple oxydo-réducteur	246
III.2	Précautions d'emploi	246
III.3	Neutralisation	247
IV	Conclusion	247
41 Oxydoréduction		248
I	Les biomolécules pour l'organisme	249
II	Conclusion	249
42 Métaux : structure et propriétés		250
I	Cristaux métalliques	251
I.1	Propriétés physico-chimiques	251
I.2	Modèle microscopique	251
II	Structures cristallines	252
II.1	Grandeurs caractéristiques d'une maille	252
II.2	Structure cubique à faces centrées (fcf)	252

Première partie

Leçons de physique

Avancement préparation oraux Leçons Physique

Titre de la leçon	Expériences	Avancement	Commentaires
Gravitation p20	Pendule simple : mesure de g	80%	Partie marées à modifier, rajouter exemples effets de marée dans le système solaire, limite de Roche à bosser
Lois de conservation en mécanique p28	Conservation de E chute bille	20%	plan détaillé
Notions de viscosité d'un fluide. Écoulements visqueux p32	Détermination de $\eta_{silicone}$ par la chute des billes	80%	
Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide p38	Mesure ρ_{air} sonde Pitot + anémomètre	100%	Bien revoir couches limites
Phénomènes interfaçiaux impliquant des fluides p43	Loi de Laplace - expériences quali bulles savon	80%	Transition gravité-mouillage
Premier principe de la thermodynamique p55	Mesure c_{fer} dans calorimètre - Expérience Joule	80%	Voir expérience de Joule
Transitions de phase p62	Mesure chaleur latente de l'eau	70%	Passage 1er ordre / 2nd ordre à bosser. Plan sans doute trop ambitieux.
Phénomènes de transport p67	Diffusion du glycérol dans l'eau	80%	à répéter
Conversion de puissance électromécanique p72	Etude MCC (résistance, rendement, ...)	60%	Finir moteur synchrone
Induction électromagnétique p77	Mesure inductance circuit RL	70%	Définition de L et inductance mutuelle, applications à travailler
Rétroaction et oscillations p87	Quali : MCC asservi., Quanti : Pont de Wien	0%	
Traitemen t d'un signal. Étude spectrale p92	Filtre RC et démodulation par détection synchrone	60%	Finir partie 3

Ondes progressives, ondes stationnaires p97	vitesse de l'onde dans un câble coaxial	40%	Faire partie onde progressive et onde stationnaire
Ondes acoustiques p101	Mesure c_{air} piézo	50%	Faire partie énergétique + chercher applications
Propagation guidée des ondes p106	Quali : piezo + tube, Quanti : guide d'onde centi	80%	Ouverture à finir + Pertes et ROS à regarder.
Microscopies optiques p113	Microscope maison, mesure grossissement	70%	Rajouter profondeur de champ, être plus synthétique pour réussir à parler de contraste de phase ou fluorescence
Interférences à deux ondes en optique p117	Mesure largeur fentes d'Young barette CCD	80%	
Interférométrie à division d'amplitude p122	Michelson : doublet sodium	100%	A revoir vite fait coin d'air
Diffraction de Fraunhofer p131	Diffraction par une fente+CCD-MHTEX Filtrage spatial	80%	Faire des choix pour les calculs
Diffraction par des structures périodiques p136	Mesures raies mercure par un réseau	80%	
Absorption et émission de la lumière p142	Emission/absorption rhodamine Spectre émission lampe à vapeur de mercure + réseau	70%	Partie système à deux niveaux : montrer qu'il n'y a pas effet laser
Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques p147	Cycle hystérésis transfo	90%	Mettre en relief appli ferro durs/doux + démo confinement lignes de champ slides
Mécanismes de la conduction électrique dans les solides p153	Mesure conductivité cuivre vs T	50%	Transitions délicates, revoir partie 1
Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique p157	Résonance en tension sur la capacité du circuit RLC + couplage mutuel circuits RLC couplés	40%	Plan à détailler
Oscillateurs; portraits de phase et non-linéarités p160	Borda sur le pendule + portrait de phase	80%	Faire des choix

Cinématique relativiste. Expérience de Michelson et Morley p165	logiciel Gum_MC, exp Frish et Smith	20%	Plan ok, manip à bosser
Effet tunnel : application à la radioactivité alpha	Simulation site colorado	80%	Faire tableau avec $T_{1/2}$ et E. Interprétation $T_{1/2}$ avec particule à travailler.

Leçon 1

Gravitation

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
La physique par la pratique	B. Portelli et J. Barthes	H&K (2005)	
Mécanique	E. Hecht	de boeck (2006)	
Mécanique, Fondements et applications	J.-Ph. Pérez	Dunod (2014)	
Physique tout-en-un 2ème année PC-PSI	M.-N. Sanz	Dunod (2004)	
Mécanique I	BFR	Dunod (1995)	

Commentaires des années précédentes :

- **2017** : Les applications ne doivent pas nécessairement se limiter à la gravitation terrestre,
- **2016** : Les analogies entre l'électromagnétisme et la gravitation classique présentent des limites qu'il est pertinent de souligner

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE 2ème année

Prérequis : Mécanique newtonienne ; Equations de Maxwell en électrostatique ; Loi de l'hydrostatique ; Référentiels non galiléens ; Lois de Kepler

Déroulé détaillé de la leçon :

Introduction

Introduction avec les 4 forces fondamentales physique. Gravitation est une interaction qui n'est pas si immédiate à comprendre car elle est responsable de la chute des corps mais en même temps tous les objets ne tombent pas à la même vitesse. Dans l'Antiquité par exemple, Aristote (Traité du ciel 350 av. J-C.) : "Plus un corps est massif, plus il tombe vite". Expérience de pensée de Galilée (Dialogue sur les deux grands systèmes du monde, vers 1632) : "Tous les objets tombent à la même vitesse dans le vide". Qui a raison ? https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/video-qu-est-ce-qui-tombe-le-plus-vite-une-plume-ou-une-boule-de-billard_23185.

C'est Newton qui comprend que les corps tombent à cause d'une force fondamentale qu'il appelle force de gravitation universelle. Nous allons tout d'abord commencer par décrire l'interaction gravitationnelle.

I Interaction gravitationnelle

I.1 Force de gravitation

Gravitation = interaction entre deux masses. Schéma avec deux masses.
 $\vec{F}_G = -\frac{m_1 m_2}{r_{12}^3} \vec{r}_{12}$.

- Force attractive dirigée suivant \mathbf{r}_{12} .
- $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$

Rappel force électrostatique $\vec{F}_e = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{12}^3} \vec{r}_{12}$.

I.2 Analogie avec le champ électrostatique (sur slide)

Analogie entre :

- Forces F_e vs F_G
- charge vs masse
- $\frac{1}{4\pi\epsilon}$ vs $-G$
- Champs électrique vs champ gravitationnel
- Equations de Maxwell-Gauss et Maxwell-Faraday en statique vs leurs analogue en mécanique

- Potentiel électrique vs potentiel gravitationnel

I.3 Champ gravitationnel d'une boule homogène

Schéma boule, coordonnées sphériques. Détermination des invariances et des plans de symétrie. Application du théorème de Gauss dans le cas $r \leq R$ pour le calcul du champ gravitationnel terrestre. Tracé du champ gravitationnel vs r . Discussion de la limite de l'analogie entre les interactions électrostatique et gravitationnelle.

II Dynamique terrestre (10'35)

II.1 Caractère non galiléen terrestre

Référentiel géocentrique supposé galiléen. $\Omega_T = \frac{2\pi}{T} = 7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$.

Calcul de l'accélération dans le référentiel terrestre (non galiléen). PFD dans le référentiel terrestre :

$$\mathbf{a} = \mathcal{G}_T(M) - \Omega_T \wedge \Omega_T \wedge \mathbf{HM} + \sum_p (\mathcal{G}_p(M) - \mathcal{G}_p(T)) - 2\Omega_T \wedge \mathbf{v}_{/R_t}(M) \quad (1.1)$$

- Les deux premiers termes : $\mathbf{g}(M)$
- Dernier terme : négligeable
- Terme de somme : terme de marée

$$\mathbf{a} = \mathbf{g} + \sum_p (\mathcal{G}_p(M) - \mathcal{G}_p(T)) \quad (1.2)$$

avec p une planète, le soleil ou un satellite.

Ordres de grandeurs des accélérations de Coriolis et d'entraînement :

$$v \simeq 1 \text{ m/s} \quad (1.3)$$

$$|a_c| = 2\Omega_T v \sim 10^{-4} \text{ ms}^{-2} \quad (1.4)$$

$$|a_e| = \Omega_T^2 R_T \sin^2(\lambda) \sim 3 \times 10^{-2} \text{ ms}^{-2} \quad (1.5)$$

II.2 Mesure du champ de pesanteur à la latitude 48.8 N (19'30)

Schéma pendule simple. PFD $\ddot{\theta} + \frac{g}{L} \sin \theta$. Approximation des petits angles $\ddot{\theta} + \frac{g}{L} \theta$.
 Période $T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$. Mesure expérimentale de la longueur de la tige, le rayon et la hauteur du cylindre. Tracé de l'angle en fonction du temps avec Latis Pro et fit sur Qtiplot.

Discussion champ de pesanteur non uniforme sur la Terre dû à la non sphéricité de la Terre.

III Effets de marées (33'20)

Le Gié (Mécanique I) ou Faroux-Renault p278-286

Schéma système Terre+Lune. Champ de marée $\mathcal{C}(M) = \mathcal{G}_L(M) - \mathcal{G}_L(T) = Gm_L \left(\frac{\mathbf{MA}}{MA^3} - \frac{\mathbf{TA}}{TA^3} \right) = G \frac{m_{Ar}}{2d^3} [(3\cos^2(\theta) - 1)\mathbf{e_r} - \frac{3}{2}\sin(2\theta)\mathbf{e_\theta}] = -\nabla V_A(M)$.

Discussion $\theta = 0$ et $\theta = \pi$ et bourrelets océaniques.

(41'30)

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

C : Vous nous avez parlé du potentiel de marée. Je n'ai pas compris le lien entre le champ \mathcal{C} et la rotation de la Terre. Du fait que la Terre tourne sur elle-même, il faut prendre en compte la force d'inertie d'entraînement qui donne le terme $\sum_p \mathbf{G}_p(T)$ dans l'expression du champ de marée sur Terre. .

C : Quel est le lien entre les marées et l'eau ? C'était pour expliquer le fait qu'on ait des marées hautes et basses sur Terre.

C : Mais ça s'applique sur tout, à la fois l'eau, la terre, les hommes. La croûte terrestre aussi peut subir une force de marée mais moins perceptible à l'œil humain.

C : Vous modélisez la terre comme un fluide ? ça dépend sur quelle durée d'observation on se place. À l'échelle des temps géologiques, la Terre est effectivement un fluide

C : Est-ce qu'il y a aussi un effet de marée de la Terre sur la Lune ?

Oui. Et c'est grâce à cet effet que la rotation s'est synchronisée et qu'on voit toujours la même face.

C : Connaissez-vous un autre exemple notable des champs de marées sur un satellite autour d'une autre planète ? Io, un satellite de Jupiter, présente une activité volcanique importante du fait des compressions et dilatations importantes du manteau générées par les forces de marées.

C : Je n'ai pas compris l'origine du second lobe de l'autre côté de la Lune ? Comment tu l'expliques Le terme de marée est un terme différentiel.

La force de marée créée par la lune en un point M de la terre a pour origine la différence entre le champ de gravitation créé par la lune au point M de la terre et le champ de gravitation créé par la lune au centre de la terre. Dans l'expression du champ de marée, on voit qu'il est maximal en $\theta = 0$ et $\theta = \pi$. Dans le premier cas, le champ est dirigé suivant $\mathbf{e}_r = \mathbf{e}_x$ et dans le second cas $\mathbf{e}_r = -\mathbf{e}_x$.

C : Vous avez introduit deux visions différentes entre Aristote et Galilée. Une façon de déterminer qui a raison et qui a tort ? Galilée s'est posé la question de savoir qu'est-ce qui se passerait si on faisait une expérience de chute libre dans le vide. Il a fait des expériences dans différents fluides pour voir l'effet de la viscosité pour mais il avait pas le moyen de le faire à l'époque.

C : On a les moyens de le faire aujourd'hui ? Avez-vous une vidéo d'expérience spectaculaire faite ? https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/video-qu-est-ce-qui-tombe-le-plus-vite-une-plume-ou-une-boule-de-billard_23185. Franchement incroyable.

C : Unité de G ? Analyse dimensionnelle donne $kg^{-1} \cdot m^3 \cdot s^{-1}$

C : Rappelez l'expression du champ électrique en fonction des potentiels. $\mathbf{E} = -\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$

C : A-t-il une analogie en mécanique ? Si on a un flux de masse, on peut définir l'équivalent du champ \mathbf{B} .

C : Peut-on mesurer son effet ? A-t-on un ordre de grandeur ? Quelle serait la correction dans la force ? Voir Effet Lense-Thirring. C'est une

correction extrêmement faible qui nécessite des masses importantes et une vitesse des corps relativiste pour qu'elle soit observable. À titre d'exemple, le pendule de Foucault devrait osciller environ 16000 ans avant de précesser de 1 degré (cf. Wikipédia).

C : Une expérience de pensée qui permettrait de mettre ça en évident ? Un tube dans lequel je fais passer des billes à vitesse constante dans le vide, il faudrait regarder l'effet que ça fait sur une bille suspendue sur un ressort.

C : Si on place une personne à l'intérieur de la terre, qu'est-ce qu'elle ressent ? Elle serait en apesanteur au centre de la terre.

C : Et au centre d'une étoile à neutron ? Au centre, en apesanteur. Par contre les forces exercées en chaque point du corps, sont très différentes et on est écartelé.

C : Dans les limites de l'analogie, vous avez dit que l'interaction électrostatique était plus grand que l'interaction gravitationnelle. Pouvez-vous quantifier ça ? Si on considère deux électrons : $\frac{F_G}{F_e} = \frac{G4\pi\epsilon_0 m_e^2}{e^2} \sim 10^{-44}$

C : Expérience : quel théorème utilisé pour l'équation ? Principe fondamental de la dynamique dans le référentiel terrestre

C : Et les forces d'inertie ? On veut juste g , c'est un g effectif qui inclus l'accélération d'entraînement.

C : Vous avez mesuré ce g effectif ? Donc vous avez pris en compte les forces d'inertie d'entraînement. Oui.

C : Et de coriolis ? Non car négligeable : $F_c = 2m\Omega_T v_{pendule}$, $F_e \sim m\Omega_T^2 T_T$ d'où $\frac{F_e}{F_c} \sim \frac{\omega_T}{2v_{pendule}} \sim 10^6$

C : Système ? masse et tige. J'ai négligé la masse de la tige, a peu près ok car facteur 10 entre les deux.

C : La mesure que vous avez faites est indépendante de la masse ? Pas tout à fait vrai. Si je voulais faire une mesure propre, il aurait fallu que je détermine le moment d'inertie du système total.

C : Slide du champ de pensanteur terrestre. Réexpliquez ce qu'est g_0 . Le rayon terrestre n'est pas homogène partout sur la terre donc variation de g_0 en fonction de la latitude.

C : et g ? Correction due à l'accélération d'entraînement.

C : Comment vous définiriez le poids pour une classe de 1ere année sup? Force de réaction c'est l'opposé du poids. Une bonne mesure du poids est l'utilisation d'une balance qui, lorsqu'il y a équilibre, donne la force de réaction du support de norme égale au poids.

Commentaires lors de la correction de la leçon

Les choix faits sont intéressants. En revanche, il y a un manque de continuité dans la leçon et dans les transitions. Le calcul du champ gravitationnel était bien maîtrisé. Vu ton intro, je m'attendais à ce que tu partes de ton expérience puis que tu discutes la dépendance en la latitude et que tu dises qu'il manque des choses puis partir sur ça.

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) Le plan est raisonnable. Pour une leçon docteure, je m'attendrais plus à partir des expériences et aller vers la modélisation.

:

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates : À aborder en priorité : la gravitation, la pesanteur, notion de référentiel, champ gravitationnel, Kepler

Notions possibles : l'égalité masse grave masse inerte ; l'altitude des satellites selon leur vitesse angulaire et en particulier pour la Terre la différence d'altitude entre satellite géostationnaire et l'ISS par exemple ; de l'astrophysique (galaxie, amas, Jupiter, trou noir, exoplanète, etc.)

Notion importante mais subtile : les effets de marées. Il faut savoir différencier ce qui vient de la rotation propre de la Terre et de sa révolution autour du Soleil. On peut parler de limite de Roche, de la façon dont se créent les anneaux

d'une planète (Saturne bien sûr, mais aussi Jupiter, trou noir, etc.). Les marées océaniques bien sûr, mais c'est un problème très complexe avec pleins d'effets subtils. À aborder avec précaution.

Ne pas oublier de contextualiser la leçon, et ici il y avait un boulevard : pleins de prix Nobel récents (2020 trous noirs, 2019 exoplanètes, 2017 ondes gravitationnelles), parler d'autres satellites (Io, Europe), parler des satellites du GPS, de Starlink, du James Webb telescope lancé récemment sur un point de Lagrange, etc.

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) : Pendule, balle de ping pong, gyroscope, viscosimètre de Stokes, ondes de surface (régime gravitaire)

Bibliographie conseillée : Le Bocquet, Faroux, Renault, *Toute la mécanique*, est très complet sur la partie effet de référentiel non galiléen sur la Terre, tout en restant au niveau prépa. Je recommande.

Leçon 2

Lois de conservation en mécanique

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Mécanique 1	H. Gié et J.-P. Sarmant	Tec&Doc (1984)	
Mécanique 2ème année	H. Gié et J.-P. Sarmant	Tec&Doc (1996)	
Mécanique PCSI-MPSI	P. Brasselet	PUF (2000)	

Commentaires des années précédentes :

- **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.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE 2ème année

Prérequis :

- Lois de la mécanique classique,

- Définition énergie mécanique, moment cinétique, moment d'une force, quantité de mouvement
- Système fermé

Introduction

Les principes de conservation sont nombreux en physique : conservation de la charge en électromagnétisme, conservation de la masse ou de l'énergie pour un système thermodynamique fermé (1er principe). Nous allons ici nous restreindre aux principes de conservations en mécanique newtonienne.

En mécanique, nous connaissons trois lois d'évolution :

1. le théorème de la résultante cinétique : $\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \sum_i \mathbf{F}_i = \mathbf{R}$,
2. le théorème du moment cinétique : $\frac{d\mathbf{L}_O}{dt} = \sum_i \mathbf{M}_{\mathbf{O},i}$,
3. le théorème de la puissance mécanique : $\frac{dE_m}{dt} = \sum_i P_i$.

Transition : Les termes $\sum_i \mathbf{F}_i$, $\sum_i \mathbf{M}_{\mathbf{O},i}$ et $\sum_i P_i$ jouent le rôle de *sources* pour les grandeurs \mathbf{p} , L_O et E_m . On va s'intéresser aux relations de conservation qui découlent de l'annulation de ces termes de sources

I Conservation de la quantité de mouvement

I.1 Système isolé

Définition : Système fermé qui ne subit aucune action extérieure donc $\forall i, \mathbf{F}_i = 0$.

En pratique cela n'arrive jamais car il y a toujours des forces gravitationnelles. Prenons un système isolé constitué de deux sous-système A et B. Si A interagit avec B et reçoit de la quantité de mouvement $\Delta\mathbf{P}_A$ alors ce dernier a dû lui céder une quantité de mouvement $\Delta\mathbf{P}_B$ telle que :

$$\Delta(\mathbf{P}_A + \mathbf{P}_B) = 0 \Leftrightarrow \Delta\mathbf{P}_A = -\Delta\mathbf{P}_B \quad (2.1)$$

Voir Tec&Doc 2ème année p110. Exemple de la diffusion de Rutherford où il y a un transfert de la quantité de mouvement. Déduire la norme de la vitesse de recul d'un atome.

Ca se voit aussi avec le recul d'une arme à feu.

I.2 Système pseudo-isolé

Définition : un système est dit pseudo-isolé s'il est soumis à des actions extérieures qui se compensent c'est-à-dire dont la résultante $\mathbf{R} = \sum_i \mathbf{F}_i$ est nulle.

Exemple : mobile placé sur coussin d'air.

I.3 Collision élastique

Expérience : Conservation de \mathbf{p} de mobiles autoporteurs.

II Conservation de l'énergie

II.1 Forces conservatives

Brasselet p71. **Définition** : une force est conservative si son travail entre deux positions quelconques ne dépend que de celles-ci et pas du chemin que le système a suivi entre ces deux points.

L'exemple le plus parlant est la force de pensanteur dont le travail entre deux points d'altitude z_1 et z_2 s'écrit :

$$W_{1 \rightarrow 2} = -mg(z_2 - z_1) = E_{p2} - E_{p1} \quad (2.2)$$

Brasselet p73. Par définition du gradient : $dE_p = \nabla E_p dr = -\delta W = -\mathbf{F} \cdot \mathbf{dr}$ donc $\mathbf{F} = -\nabla E_p$.

III Conservation du moment cinétique

III.1 TMC

III.2 Système pseudo-isolé

III.3 Cas d'une force centrale

Conclusion

Ouverture sur les théorèmes de Noether (Emmi Noether, mathématicienne allemande (1882-1935) :

1. La conservation de la quantité de mouvement est une conséquence de **l'invariance des lois de la physique par translation spatiale**, c'est-à-dire de l'homogénéité de l'espace,
2. La conservation du moment cinétique est une conséquence de **l'invariance des lois physiques par rotation**, c'est-à-dire de l'isotropie de l'espace,
3. La conservation de l'énergie est une conséquence de **l'invariance des lois physiques par translation temporelle**, c'est-à-dire de l'homogénéité du temps.

Leçon 3

Notions de viscosité d'un fluide. Ecoulement visqueux.

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Hydrodynamique physique	Guyon, Hulin, Petit	EDP Sciences	
Poly de cours	Marc Rabaud		
Physique Spé PC/PC*	S. Olivier	Tec&Doc (2000)	

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE 2ème année

Prérequis :

- cinématiques des fluides
- loi de l'hydrostatique, poussée d'Archimède
- diffusion

Commentaires des années précédentes :

- **2017** : Il peut être judicieux de présenter le fonctionnement d'un viscosimètre dans cette leçon,
- **2016** : Le jury invite les candidats à réfléchir d'avantage à l'origine des actions de contact mises en jeu entre un fluide et un solide,
- **2014, 2013, 2012, 2011** : L'exemple de l'écoulement de Poiseuille cylindrique n'est pas celui dont les conclusions sont les plus riches. Les candidats doivent avoir réfléchi aux différents mécanismes de dissipation qui peuvent avoir lieu dans un fluide. L'essentiel de l'exposé doit porter sur les fluides newtoniens : le cas des fluides non newtoniens, s'il peut être brièvement mentionné ou présenté, ne doit pas prendre trop de temps et faire perdre de vue le message principal.

Déroulé détaillé de la leçon :

Introduction

On a décrit dans un cours précédent l'équation du mouvement pour un fluide parfait. Hors, il existe beaucoup de situation où le modèle du fluide parfait ne permet pas d'expliquer le comportement de l'écoulement du fluide. [Manip qualitative : cylindre pour l'expérience de Taylor-Couette](#). Brancher une alim stabilisée +12V-12V au moteur. Serrer la vis en bas du cylindre pour libérer le mouvement du cylindre extérieur. On voit la diffusion de la quantité de mouvement qui est impossible à expliquer dans le cadre du modèle du fluide parfait. Il y a ce qu'on appelle une force de viscosité qui va diffuser la quantité de mouvement du fluide. C'est ce qu'on va voir dans cette leçon.

I Notion de viscosité

cf Chap 2 Guyon Hulin Petit.

I.1 Viscosité de cisaillement

Voir Tec&Doc p418. On considère un écoulement de la forme $\mathbf{v} = v_x(z)$ dans un fluide. On considère un élément de surface $d\mathbf{S} = dx dy \hat{\mathbf{u}}_z$ d'ordonnée z séparant

le fluide situé au-dessus de z et en dessous de z. L'action de contact, appelée **force de viscosité**, exercée par le fluide situé au-dessus de z sur le fluide situé en-dessous de z est tangentielle à la vitesse de l'écoulement :

$$d\mathbf{F}_t = \eta \frac{\partial v_x}{\partial z} dS \hat{\mathbf{u}}_x \quad (3.1)$$

où on introduit le coefficient de viscosité cinématique η de dimension Pa.s^{-1} comme on peut le voir avec la formule. **Donner quelques exemples de η sur slide (miel et eau).** **Remarques :**

- Plus η est grand plus la force de viscosité de cisaillement est élevée (c'est pour ça qu'on dit que le miel est plus visqueux que l'eau),
- force non nulle si champ de vitesse inhomogène
- le sens de la force est tel qu'il tend à homogénéiser le champ des vitesses : la couche de fluide du dessus qui va plus vite met en mouvement la couche de dessous : **il y a une diffusion de la quantité de mouvement** des couches du fluide les plus rapides vers les couches les moins rapides.

I.2 Équivalent volumique de la force de viscosité

Considérons un pavé élémentaire de volume $d\tau = dx dy dz$ en prenant le même champ de vitesse que précédemment. Un bilan des forces (sans la force de pression normale aux surfaces) conduit à :

- $d\mathbf{F}_{z+dz} = \eta \frac{\partial v_x}{\partial z} (z + dz) dx dy \mathbf{u}_x$ car le fluide sur la couche de dessus va plus vite,
- $d\mathbf{F}_z = -\eta \frac{\partial v_x}{\partial z} (z) dx dy \mathbf{u}_x$ car le fluide sur la couche de dessous va moins vite.

Un développement de Taylor à l'ordre 1 permet d'écrire la résultante comme :

$$d\mathbf{F} = \eta \frac{\partial^2 v_x}{\partial d_z^2} d\tau \mathbf{u}_x \quad (3.2)$$

$$\mathbf{f}_{visc} = \frac{d\mathbf{F}}{d\tau} = \eta \Delta \mathbf{v} \quad (3.3)$$

La dernière formulation est valable pour les écoulements incompressibles ! C'était une hypothèse dont on se passait pour les fluides parfaits.

Remrque : On a l'analogie avec les phénomènes de transport diffusif de la chaleur $\lambda \Delta T$ et de la quantité de matière $D \Delta n$.

Transition : Maintenant qu'on a vu la force volumique de viscosité pour un fluide visqueux, on peut l'injecter dans les équations du mouvement du champ de vitesse eulérien du fluide.

II Dynamique d'un fluide visqueux

II.1 Equation de Navier-Stokes et nombre de Reynolds

Le principe fondamental de la dynamique dans un référentiel galiléen appliquée à une particule fluide suivant le champ de vitesse eulérien \mathbf{v} du fluide s'écrit désormais :

$$\left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \text{grad})\mathbf{v} \right) = -\text{grad}P + \rho \mathbf{g} + \nu \Delta \mathbf{v} + \mathbf{f}_{vol} \quad (3.4)$$

où on a introduit ici la viscosité cinématique $\nu = \frac{\eta}{\rho}$. C'est l'équation de Navier-Stokes.

Donner les coefficients de viscosité cinématique de fluides (eau-air-silicone-poix(?)) homogène à un coefficient de diffusion. voir Tec&Doc p423. Parler de l'expérience de la goutte de poix (cf Wikipédia) ?

Remarques : comme l'équation d'Euler, cette équation est non-linéaire donc très difficile à résoudre numériquement ou analytiquement (problème du millénaire en maths). Il faut donc comparer les termes entre eux pour pouvoir simplifier possiblement les équations.

C'est possible par exemple (les autres sont dans le cours de Marc Rabaud) en introduisant le nombre de Reynolds qui compare l'accélération convective au terme de viscosité :

$$Re = \frac{\|(\mathbf{v} \cdot \text{grad})\mathbf{v}\|}{\|\nu \Delta \mathbf{v}\|} \quad (3.5)$$

Dans un problème possédant une échelle spatiale unique L , une vitesse d'écoulement typique U , le nombre de Reynolds devient :

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (3.6)$$

On décrit les limites $Re \gg 1$ et $Re \ll 1$. On va voir qu'il est possible de mesurer la viscosité dans le cas où le nombre de Reynolds est très petit devant 1 et qu'on a un écoulement stationnaire.

II.2 Viscosimètre à chute de bille : force de Stokes

Lorsqu'on fait tomber une bille de rayon r dans un fluide, on constate phénoménologiquement (on eut la retrouver par une analyse dimensionnelle) qu'il existe une force dites **force de traînée** s'opposant à la vitesse dont l'expression pour les vitesses faibles est donnée par (voir HPrépa p153 exercice 6) :

$$\mathbf{F} = -6\pi\eta r\mathbf{v} \quad (3.7)$$

Manip quantitative : mesure de la viscosité du silicone :

- écran lumineux,
- cylindre contenant une huile de silicone $\nu = 500 \text{ cst} = 5.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$,
- une caméra ultra-rapide,
- un ordi avec le logiciel Tracker,
- des billes de métal de différents diamètres

Incertitude : faire varier un peu la longueur et fitter $x=f(t)$ pour avoir différentes vitesses + incertitude sur le pointage : prendre quelques pixels (moitié de la sphère).

Bilan des forces : poids, poussée d'Achimède, force de traînée :

$$\begin{aligned} \Pi + \mathbf{F}_t + \mathbf{P} &= 0 \\ 6\pi\eta Rv_\infty + \frac{4}{3}\pi R^3 (\rho_{silicone} - \rho_{acier}) g &= 0 \\ v_\infty &= \frac{2(\rho_{acier} - \rho_{silicone})g}{9\eta} R^2 \end{aligned}$$

On trace $v_\infty = f(R^2)$, on trace également le Reynolds. On montre que la loi de Stokes n'est valable que pour les petites sphères et qu'effectivement on tend vers la valeur de $\nu = 500 \text{ m}^2/\text{s}$

Introduire le coefficient de traînée $C = \frac{F_t}{\frac{1}{2}\rho_S v^2}$ (dépend de la géométrie) et montrer la courbe $C=f(Re)$ p325 Dunod 2019.

Réversibilité cinématique : 16min01 <https://www.youtube.com/watch?v=51-6QCJTAjU&list=PL0EC6527BE871ABA3&index=8>

II.3 Notion de couche limite

II.4 Transport diffusif de la quantité de mouvement

II.5 Aspect énergétique

Fluide visqueux = dissipation d'énergie. Démo p265 Guyon Hulin Petit.

II.6 Conditions aux limites cinématiques et dynamiques

Tableau de comparaison fluides parfaits fluide réels.

Leçon 4

Modèle de l'écoulement parfait d'un fluide

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Hydrodynamique	Guyon, Hulin, Petit		
Tout-en-un PC/PC*	M.-N. Sanz	Dunod (2019)	
Wikipédia	Il y a pas mal de choses cool		
Mécanique 2ème année	H. Gié et J.-P. Sarmant	Tec&Doc (1996)	
Physique-Chimie PSI/PSI*	Pascal Olive	Ellipses (2022)	

Commentaires des années précédentes :

- **2017** : La multiplication des expériences illustrant le théorème de Bernoulli n'est pas souhaitable, surtout si celles-ci ne sont pas correctement explicitées,
- **2016** : Les limites de ce modèle sont souvent méconnues,
- **2015** : Le jury invite les candidats à réfléchir davantage à l'interprétation de la portance et de l'effet Magnus. Les exemples cités doivent être correctement traités, une présentation superficielle de ceux-ci n'étant pas satisfaisante,
- **2014 2013, 2012, 2011** : La notion de viscosité peut être supposée acquise.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE 2ème année

Prérequis :

- Viscosité, équation de Naviers-Stokes, équation de l'hydrostatique
- calcul de l'accélération convective dans un écoulement parallèle
- Champ eulérien, lignes de champ, lignes de courant

Introducción

Les équations de la mécanique des fluides décrivent l'évolution du champ eulérien de vitesse dans le référentiel d'un observateur fixe. Dans certains cas comme un écoulement d'eau sous un pont, ou un écoulement d'air sur une aile d'avion ([Montrer sur slide étude IFREMER sur l'effet d'un écoulement turbulent sur une hydrolienne](#)), il se crée des phénomènes de vorticité/turbulences liés aux effets de viscosité des fluides. Parler de ressaut hydrolique ? Dans le cadre de cette leçon, on va se placer loin de ces zones complexes c'est-à-dire en amont ou loin en aval de l'écoulement.

I Modèle de l'écoulement parfait

I.1 Équation d'Euler

Slide : équation de Navier-Stokes.

Modèle de l'écoulement parfait : $\eta = 0$ dans Navier-Stokes.

Remarques :

1. Si fluide au repos, on retrouve l'équation de l'hydrostatique,
2. Équation toujours non linéaire donc extrêmement difficile à résoudre (problème du Millénaire avec l'équation de Navier-Stokes),
3. Dans les cas pratiques que nous verrons plus loin, on peut considérer l'écoulement parfait si $\eta \Delta \mathbf{v} \ll$ autres termes de l'équation. Par exemple, si $Re = \frac{|\mathbf{v} \cdot \text{grad}|}{\nu \Delta \mathbf{v}} >> 1$

I.2 Conséquence : effet de la courbure des lignes de courant

Voir Dunod. Prendre une vitesse orthoradiale, montrer que $\frac{\partial P}{\partial r} > 0$. Faire le dessin d'une balle soumise à un flux d'air. L'air va adhérer à la surface par les interactions moléculaires Manip qualitative : Montrer l'effet Coanda avec la balle de ping-pong. On peut aussi faire avec une cuillère et un filet d'eau, la cuillère est attirée vers le filet d'eau qui impose un gradient de pression de la surface de la cuillère vers l'extérieur.

Transition : Puisqu'on a annulé les effets de frottements visqueux qui sont dissipatifs, on va voir qu'on a conservation de l'énergie ;

I.3 Théorème de Bernouilli

Hypothèses :

- Ecoulement parfait et stationnaire
- Ecoulement incompressible : $\rho = cste$,
- que forces de pression et de pesanteur (dirigée suivant $-\hat{\mathbf{u_z}}$)

Pour des hypothèses plus générales, voir H. Gié p190.

Le long d'une ligne de courant (Daniel Bernouilli (1738) :

$$\rho \frac{v^2}{2} + P + gz = cste \quad (4.1)$$

Cela constitue une équation de conservation de l'énergie d'un fluide. Savoir qu'on peut le démontrer pour un écoulement compressible, ou potentiel $\text{grad } \wedge \mathbf{v} = 0$.

Transition : on va voir quelques applications de ce théorème.

II Applications

II.1 Les sondes Pitot

Bien fait dans le Pascal Olive.

Du nom d'Henri Pitot (1730) qui voulait mesurer le débit de la Seine.

Faire le dessin. Attention, mettre point d'arrêt A à l'intérieur du tube. On a un écoulement parfait hors de la couche limite et il n'y a pas de discontinuité de la

pression dans la couche. Cf Guyon-Hulin-Petit p494.

Application Bernouilli le long de la ligne de courant passant par A_∞A :

$$P_A = P_0 + \frac{1}{2} \mu v_0^2 \quad (4.2)$$

Application Bernouilli le long de la ligne de courant passant par B_∞B' :

$$P_0 = P_{B'} = P_B \quad (4.3)$$

comme les lignes de courant sont parallèles à l'axe BB' (cf équation d'Euler).

On en déduit la conversion de la différence de pression à l'intérieur du tube et la vitesse de l'écoulement :

$$v_0 = \sqrt{\frac{2(P_A - P_B)}{\mu}} \quad (4.4)$$

Remarques :

1. On a négligé les variations d'altitude des points A et A_∞, B_∞ et B', B' et B par rapport aux variation de vitesse ou de pression : $g\Delta z \sim 0.01 - 0.1 m^2.s^{-2}$ vs $0.5 * v_0^2 \sim 50 m^2.s^{-2}$
2. On a supposé que le fluide ne rentrait pas dans l'ouverture au niveau de B ce qui n'est pas justifiable dans un modèle d'écoulement parfait. Du fait de la viscosité, il y a une couche limite (de très faible épaisseur $\delta(x) \propto \frac{1}{Re_x}$) qui donne une vitesse nulle au point B. Mais il y a continuité de la pression à la normale à la paroi ce qui permet d'utiliser Bernouilli loin de la couche limite.

Transition : on va vérifier expérimentalement le théorème de Bernouilli et voir qu'on peut en déduire la masse volumique de l'air.

II.2 Mesure de la masse volumique de l'air

Manip quantitative : utilise une soufflerie, un anémomètre à fil chaud et un tube de Pitot relié à un manomètre différentiel lui même relié à un voltmètre METRIX. Il faut une alimentation continue +12V pour le manomètre et bien mesurer la tension à pression atmosphérique ($\sim 2.266V$).

Attention au sens de l'anémomètre à fil chaud, la flèche doit être dans le sens de l'écoulement.

On représente $P_A - P_B = f(v^2/2)$ et on obtient une droite de coefficient $\mu_{air}(T) = 1.43(14) \text{ kg.m}^{-3}$. A comparer à celle attendue à cette température (cf Wikipédia). Commenter les incertitudes, le Z-score, l'anémomètre (précision : $0.03m/s + 5\% \text{ valeur moyenne}$ ce qui est important!).

II.3 Effet Venturi

Une autre application du théorème de Bernouilli est l'effet Venturi. Faire le schéma.

Equation d'incompressibilité :

$$v_A = v_B \frac{s}{S} = v_C \quad (4.5)$$

Théorème de Bernouilli le long de ABC :

$$P_A - P_B = \frac{1}{2} (v_B^2 - v_A^2) = \frac{1}{2} v_A^2 \left(\frac{S^2}{s^2} - 1 \right) \quad (4.6)$$

qui relie différence de pression et géométrie du dispositif par l'intermédiaire du débit. On peut donc mesurer le débit ! Montrer qu'il y a des pertes de charges car le niveau en C n'est pas le même qu'en A, il faut prendre en compte les effets de viscosité pour être vraiment précis mais au premier abord ça marche bien.

Conclusion

Conclure sur l'hélium liquide. Photo sur slide ou vidéo youtube à partir de 1min : <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=helium+superfluide#fpstate=ive&vld=cid:fef88f2b,vid:2Z6UJbwxBZI>.

Ouvrir sur le paradoxe de d'Alembert : si pas de viscosité, pas de résistance au mouvement d'une plaque ou d'une aile d'avion : une aile d'avion ne peut pas voler ? Hé non car viscosité induit un décollement des lignes de champs qui implique une force de trainée.

Leçon 5

Phénomènes interfaciaux impliquant des fluides

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
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)	
Notes de cours sur les fluides (2019-2020)	Marc Rabaud	Site agreg Montrouge	
Why is surface tension a force parallel to the interface ? https://arxiv.org/abs/1211.3854	Marchand, A., Weijs, J. H., Snijer, J. H., & Andreotti, B	American Journal of Physics (2011)	
Ce que disent les fluides	Guyon, Hulin, Petit		
Toute la physique dans un verre d'eau	Clément Santa-maria	Ellipses (2005)	
Thermodynamique	B. Diu	Hermann (2007)	

Commentaires des années précédentes :

- **2014** : Le lien avec les potentiels thermodynamiques n'est pas souvent maîtrisé. Il est important de dégager clairement l'origine microscopique de la tension superficielle. Le jury constate que trop souvent les candidats présentent des schémas où la représentation des interactions remet en cause la stabilité mécanique de l'interface. Le jury apprécie les exposés dans lesquels le/la candidat(e) ne se limite pas à la statique.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Licence 3

Prérequis :

- Forces, travail, énergie
- Principe de travaux virtuels
- Equation de l'hydrostatique
- interactions intermoléculaires

Introduction

L'étude des phénomènes interfaciaux permet de répondre à un certain nombre de questions comme : pourquoi est-ce que certains insectes marchent sur l'eau, pourquoi les gouttes et les bulles ont la formes qu'elles ont, pourquoi en TP de chimie, lorsqu'on met un liquide dans un tube, on voit la formation d'un ménisque, pourquoi encore voit-on des flaques et pas des bulles d'eau posée sur le sol ? Ces différentes observations nous amènent en réalité à étudier les propriétés des interfaces liquide/gaz, liquide/solide, solide/gaz ou parfois les 3 en même temps ! Nous allons dans cette leçon essayer d'interpréter ces phénomènes qui nous paraissent somme toute très naturels.

I Tension superficielle

I.1 Origine microscopique

Une molécule en volume subit des interactions attractives de la part de ses voisines qui la stabilisent. Une molécule à l'interface a moins de voisines qu'en-dessous : cette configuration augmente son énergie de la différence $\Delta E = p_{sup}E_{intermolec} - p_{sub}E_{intermolec}$ avec p le nombre de premiers voisins. Attention, ici $E_{intermolec}$ est négatif. Par exemple en configuration carré, $p_{sub} = 8$ et $p_{sup} = 5$. **Le fluide ajuste donc sa forme pour exposer le minimum de surface afin de minimiser son énergie. Surface = lieu des contraintes**

I.2 Définition

L'énergie pour nécessaire pour accroître la surface d'une interface d'une quantité dS est égale à ce coût en énergie multiplié par le nombre de molécules en surface qui est lui-même proportionnel à dS :

$$\delta W = \gamma dS \quad (5.1)$$

avec γ le coefficient de tension de surface (J.m^{-2}). L'ordre de grandeur de γ doit être celui des énergies de liaison divisé par la surface d'interaction de la molécule (typiquement une sphère de rayon quelques Å. Ex : pour l'interface eau-air, $\gamma = 72.8 \text{ mJ/m}^2$ à 20°C.

slide tableau des valeurs de γ . On commente le fait que pour les métaux, les énergies de liaison sont plus fortes et donc γ est plus grand.

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

Voir Diu Complément 5a. pour l'approche énergétique de la bulle de savon. vidéo bulle d'eau dans l'espace : https://www.youtube.com/watch?v=bKk_7NIKY3Y.

I.3 Force capillaire

Expérience qualitative films de savon sur des surfaces (surface avec ficelle) : si on perce un film de savon, la ficelle se déplace. Le coefficient de tension de surface peut également être vu comme une force par unité de longueur. Pour un film de savon rectangulaire, il y a deux interfaces air-liquide dont les vecteurs normaux à la surface sont opposés. Tout segment $d\mathbf{l}$ dans le plan de cette surface est soumise à deux forces égales et opposées si cette surface est à l'équilibre :

$$d\mathbf{f} = \gamma((+\hat{\mathbf{n}}) \wedge d\mathbf{l}) + \gamma((- \hat{\mathbf{n}}) \wedge d\mathbf{l}) \quad (5.2)$$

Cette force est tangeante à la surface et normale au contour séparant les deux systèmes.

Vidéo force capillaire https://www.youtube.com/watch?v=g4c_tj1CccE.

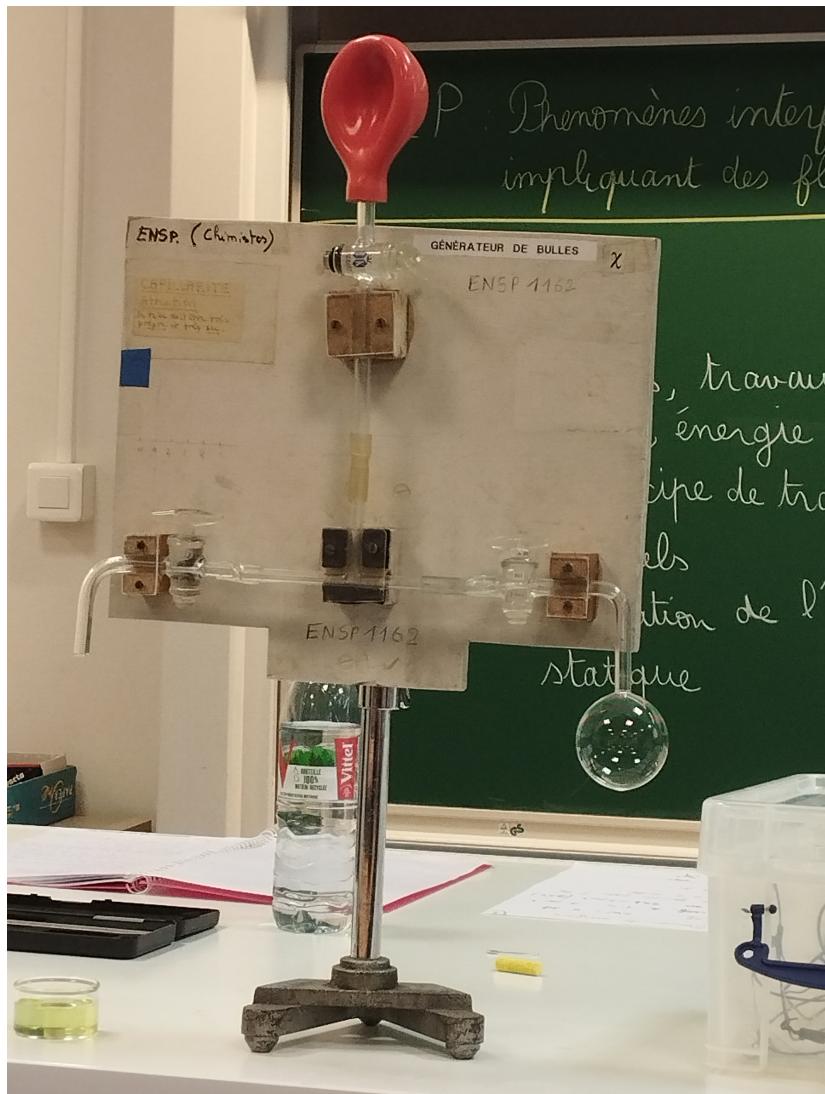
Permet de répondre à pourquoi le geris peut marcher sur l'eau : les pattes hydrophobes du gerris déforment la surface de l'eau (cf clément Santamaria p60) qui va chercher à retrouver sa forme en appliquant une force capillaire sur les pattes. Comme l'insecte est suffisamment léger, la force arrive à compenser le poids.

Transition : On a vu l'exemple des surfaces planes, on va s'intéresser à présent aux interfaces courbes et on va se poser la question : la pression dans une petite bulle est-elle plus grande ou plus petite que dans une grande bulle ,

II Pression et tension de surface

II.1 Loi de Laplace

Nous avons ici un générateur de bulle. On va faire une expérience simple en créant deux bulles de tailles différentes. La petite bulle est "mangée" par la grosse.



La différence de pression avec l'extérieur 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 qu'on accroît le rayon de la bulle de dR sous une différence de pression $\Delta P = P_1 - P_2$ constante. La valeur de ΔP correspondant à l'équilibre mécanique sera telle que la variation d'énergie totale δW_{tot} correspondante est nulle. Celle-ci est la somme du :

1. travail des forces de pression $\delta W_p = -(P_1 - P_2)d(\frac{4}{3}\pi R^3)$

2. la variation d'énergie de surface de la sphère : $\delta W_s = 2d(4\pi R^2\gamma)$, le facteur 2 correspond au fait qu'il y a deux interfaces pour une bulle.

A l'équilibre : $\delta W_p + \delta W_s = 0$. Finalement : **Loi de Laplace** :

$$(P_1 - P_2) = \frac{4\gamma}{R} \quad (5.3)$$

- 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.
- Remarque : pour une goutte, il y a 1 interface liquide-air donc $(P_1 - P_2) = \frac{2\gamma}{R}$

II.2 Mesure de $\gamma_{savon-air}$

Expérience : Pour une bulle de savon, deux interfaces donc $\Delta P = \frac{4\gamma}{R}$. On génère une bulle, on mesure son rayon à l'aide d'un pied à coulisse et la pression à l'intérieur grâce à un manomètre différentiel. Il permet 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 $\delta P = \frac{A}{R}$ permet d'obtenir γ . **Tracer plutôt $R = f(\Delta P)$ car incertitude max sur R.**

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).

II.3 Cas général (cette partie peut sauter)

Faire la démo.

• Face capillaire au point M: $\vec{F}_c(M) = \gamma d\vec{s} \vec{E}$ } force perpendiculaire à la direction normale au plan
 • Face capillaire au point M': $\vec{F}_c(M') = \gamma d\vec{s} (\vec{t} + \vec{t}')$ } force perpendiculaire à la direction normale au plan.
 Donc $\vec{dF}_c = \vec{F}_c(M) + \gamma d\vec{s} \vec{t}' \Rightarrow d\vec{F}_c = \gamma d\vec{s} d\vec{t}'$ (au premier ordre en $d\vec{s}$)

On :
 • $\frac{d\vec{t}}{d\theta} = -\vec{m}$
 • $d\vec{s} = R' d\theta$

Donc $d\vec{F}_c = -\gamma \frac{d\vec{s} d\vec{s}}{R'} \vec{m}$. Si autre courbure R'' dans un plan transverse à celle courbure :
 $d\vec{F}_c = -\gamma \frac{d\vec{s} d\vec{s}}{R''} \vec{m}$

À l'équilibre, les faces de capillarité et les faces de pression appliquées à $d\vec{s}$ se compensent :
 $d\vec{F}_p = P_1 d\vec{s} d\vec{s} \vec{m} + P_2 d\vec{s} d\vec{s} (-\vec{m})$ (par définition de \vec{m})

Donc $(P_2 - P_1) = \gamma \left(\frac{1}{R'} + \frac{1}{R''} \right)$ Loi de Laplace

Insister sur le caractère algébrique de R' et R'' . Slide : Film de savon entre deux anneaux. Faire un schéma bulle normale, bulle caténoïde Pour la caténoïde, $\frac{1}{R} = -\frac{1}{R'}$ ce qui permet de satisfaire la loi de Laplace en tout point de l'interface dans le cas où les pressions sont égales de part et d'autre.

Transition : ce qu'on a vu dans cette partie c'est que les effets de capillarité sont directement reliés à la courbure des interfaces pour des petits objets. Mais pour des gros objets, il y a des effets de gravité qui s'ajoutent ce qu'on a vu dans l'expérience avec les bulles de savon.

III Influence de la gravité

slide : gouttes de mercure sur une plaque de verre. Plus la taille de la bulle est grande, plus la forme sphérique est déformée. Il y a un effet de gravité qui n'est plus négligeable à partir d'une certaine taille : laquelle ? C'est ce qu'on va voir

dans cette partie.

III.1 Nombre de Bond

Considérons une goutte sphérique posée sur une surface plane solide. Cette goutte est plongée dans un fluide de masse volumique ρ et possède une masse volumique $\rho + \Delta\rho$.

La différence de pression hydrostatique au point M(z=h) de la goutte est donnée par la loi de l'hydrostatique :

$$P_1 + (\rho + \Delta\rho)gh = P_2 + \rho gh \quad (5.4)$$

$$P_1 - P_2 = \Delta\rho gh = \Delta P_{grav} \quad (5.5)$$

La différence de pression capillaire à l'interface est donnée par la loi de Laplace :

$$P_1 - P_2 = 2\frac{\gamma_{LG}}{R} = \Delta P_{cap} \quad (5.6)$$

On définit le nombre de Bond B_O comme le rapport entre ces deux différences de pression :

$$B_O = \frac{\Delta P_{grav}}{\Delta P_{cap}} \sim \frac{\Delta\rho gr_g^2}{\gamma} = \left(\frac{r_g}{l_c}\right)^2 \quad (5.7)$$

avec r_g le rayon de la ligne de contact. On a défini ici une longueur appelée longueur capillaire $l_c = \sqrt{\frac{\gamma_{LG}}{\Delta\rho g}}$. Cela nous amène à distinguer deux cas :

- Si $l_c \gg R$, alors les effets gravitaires sont dominants,
- Si $B_O \ll 1$,

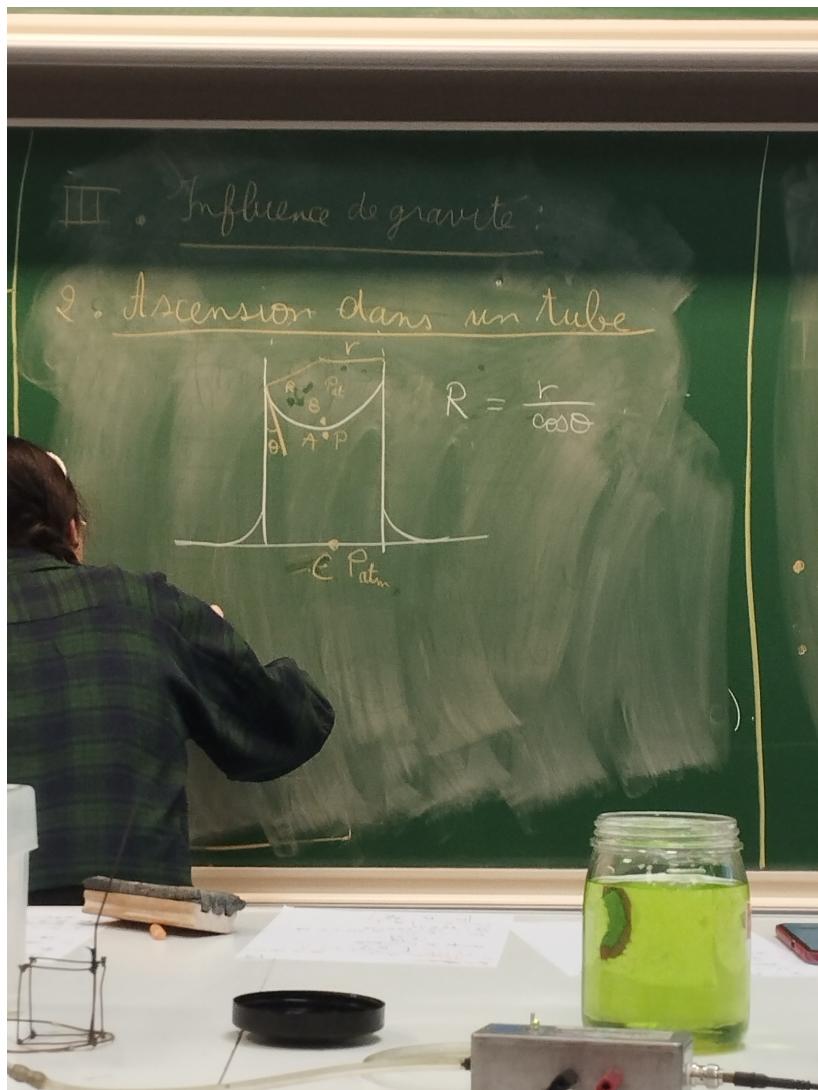
Compétition entre gravité et tension de surface : $B_0 = \frac{\rho R^2 g}{\gamma}$. La longueur capillaire l_c est telle que : $B_0 = \frac{\rho l_c^2 g}{\gamma} = 1$ (frontière entre les deux régimes), soit $l_c = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}}$.

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. Menisque concave pour un fluide mouillant (ex : eau dans tube en verre) et convexe pour un fluide peu mouillant (ex : mercure dans tube en verre)



III.2 Ascension capillaire dans un tube

Vidéo de l'ascension d'un liquide dans différents tubes capillaires (voir site Laurent Le Guillou dans la partie TP). 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** :

$$h = \frac{2\gamma \cos(\theta)}{\rho gr} \quad (5.8)$$

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

IV Effet de mouillage

Mouillage : étude de l'étalement d'un 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** :

$$\gamma_{LG} \cos(\theta) = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} \quad (5.9)$$

Conclusion (40min)

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

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

C : C'est quoi un tensioactif ? Élément qui diminue la tension de surface. Il est composé d'une tête hydrophile et d'une queue hydrophobe. La tête va se mettre à l'interface du côté de l'eau tandis que la queue sera du côté de l'air, faisant le lien entre l'eau et l'air. Cette configuration permet de diminuer l'énergie de l'interface, et donc diminue la tension de surface.

C : La dynamique de l'ascension dans la loi de Jurin semble différente en fonction du diamètre du tube ? Pouvez-vous discuter des éléments à prendre en compte pour essayer de comprendre pourquoi ça monte plus vite ou plus lentement ? Plus le rayon est grand, plus la vitesse est grande. Peut se comprendre en ordre de grandeur via $\nabla P = \eta \Delta v$ soit $\frac{P}{h} \sim \eta \frac{v}{r^2}$

C : Où placeriez-vous cette leçon dans le cours global de mécanique des fluides ? Après l'équation de Navier-Stokes. C'est presque une domaine un peu à part.

C : Peut-on imaginer qu'on n'ait pas de saut de pression à travers une surface courbe ? En utilisant l'équation de Laplace pour une surface quel-

conque, $\Delta P = \gamma(1/R + 1/R')$, R et R' sont les deux rayons de courbures de la surface en un point donné et sont algébriques (compté positivement si le centre de la courbure est à l'intérieur de la surface, négativement sinon. Par exemple, pour un point selle, on a $R' = -R$ impliquant une continuité de la pression.

C : Dans l'équation de Young-Dupré, vous avez dessiné 3 forces mais il ne me semblait pas qu'on était en équilibre (au moins à la normale à la surface) La force de réaction du support compense la composante normale de la force de tension de surface.

C : D'autres façon pour déterminer γ ? Tensiomètre à plaque de Wilhelmy : on mesure la force exercée sur la plaque par le liquide grâce à une microbalance, et on peut en déduire γ .

C : Dessin d'une goutte sur un plan incliné ? De quoi dépendrait l'angle d'inclinaison ? Vitesse, viscosité, et coefficient de tension de surface.

C : Pouvez-vous expliquer pourquoi on peut faire des chateaux de sables avec du sable mouillé ? La présence d'eau va créer un pont capillaire entre deux grains qui va augmenter la force de cohésion entre les grains. Cette cohésion se fait sur une surface beaucoup plus grande pour le grain mouillée grâce au pont capillaire alors que pour un grain sec, cette cohésion se fait au niveau d'une rugosité (très petite surface) et donc insuffisance pour maintenir un château de sable.

C : Pourquoi les serviettes sont râches quand elle sèche ? Quel est le principe d'un adoucissant ? Lorsqu'une serviette est mouillée, l'eau va chercher à minimiser son interface avec l'air en collant et écrasant les fibres de la serviette (c'est aussi pour ça que nos cheveux sont collés en sortant de la douche). En séchant, la serviette durcit, lui donnant une texture râche. L'adoucissant agit chimiquement sur les fibres pour rendre le linge plus doux au toucher.

C : $\gamma(T)$? Que se passe-t-il s'il y a des endroits du fluide qui sont plus chauds que d'autres ? Crédit à Marangoni. Création d'un gradient de tension de surface qui va causer un déplacement du liquide des zones de faibles γ vers les zones de γ élevée (cf. effet Marangoni).

C : On parle parfois de liquide mouillant et de liquide non-mouillant. Valeurs de θ ? Mouillage total : $\theta = 0$, non-mouillage total : $\theta = \pi$.

C : Commenter les incertitudes sur l'expérience ? Incertitudes dominantes sur la mesure du rayon avec le pied à coulisso que j'ai pris de 0.5mm, ce qui est une grande incertitude.

C : Principe du manomètre ? Un piézoélectrique subit une contrainte mécanique sous l'effet de la différence de pression, générant une tension que l'on mesure. Le constructeur nous donne la relation de conversion entre tension et

pression.

Commentaires lors de la correction de la leçon

Bonne leçon, beaucoup apprécié toutes les expériences montrées. Vous maîtrisez pas mal de choses. Attention à ce que le dispositif ne gène pas la vue sur le tableau.

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) :

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates :

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) :

Bibliographie conseillée :

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) :

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates :

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) :

Bibliographie conseillée :

Leçon 6

Premier principe de la thermodynamique

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Physique Tout en 1 MPSI PTSI	Bernard Salamito et al.	Dunod	
Thermodynamique 1ère année MPSI- PCSI-PTSI	Jean-Marie Brébec	H Prépa (Hachette Supérieur)	
Thermodynamique	B. Diu	Hermann (2007)	

Commentaires des années précédentes :

- **2017** : Des exemples concrets d'utilisation du premier principe de la thermodynamique sont attendus,
- **2016** : La notion d'équilibre thermodynamique n'est pas toujours bien comprise. Des exemples pertinents doivent être utilisés pour mettre en exergue l'intérêt du premier principe, y compris pour l'introduire
- **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.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : 1ère année de CPGE

Prérequis : Système thermodynamique fermé; Transformation thermodynamique quasi-statique; Fonctions d'état; Equilibre thermodynamique; Energies cinétique et potentielles, Travail d'une force

Déroulé détaillé de la leçon :

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 (ni échange d'énergie, ni échange de matière avec l'extérieur), 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.

Leçon placée en 1re année CPGE. Review des prérequis.

I Premier principe de la thermodynamique

Système (Σ) fermé.

I.1 Enoncé

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

$$\Delta E = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U = W + Q \quad (6.1)$$

Interprétation :

- $\mathbf{U} : \sum_i E_{c,micro} + E_{p,micro}$

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

I.2 Travaux des forces de pression (11min30)

Voir Diu p80. 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 \mathbf{dM} .

Force appliquée au système en un point M : $\mathbf{dF} = -P_e \mathbf{dS}$. Travail associé $\delta^2 W = \mathbf{dF} \cdot \mathbf{dM} = -P_e \mathbf{dS} \cdot \mathbf{dM} = -P_e d^3 V$. 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 .

I.3 Exemples de bilan d'énergie

Transformation isochore

$dV = 0$ d'où $W = 0$ donc $\Delta U = Q$. Pour toute transformation isochore, la variation de l'énergie interne est dûe aux transferts thermiques avec l'extérieur.

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) : $\Delta H = Q + W_{autre}$.

Trasition : Maintenant qu'on a décrit les outils permettant de décrire les transformations, on va voir quelques applications du premier principe.

II Applications du premier principe (20min)

II.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 : $C_P = (\frac{\partial H}{\partial T})_P \rightarrow c_P = \frac{C_P}{m}$.

II.2 Calorimétrie (24min)

Manip quantitative : mesure de la capacité thermique d'un solide (fer, cuivre, laiton...). Pour cela, on a besoin de :

- deux vase dewar avec agitateur permettant d'homogénéiser le contenu,
- de l'eau, une bouilloire,
- un morceau de laiton/fer/cuivre de masse importante ($m > 100\text{g}$),
- deux thermocouples,
- une balance

On peut remonter à la capacité calorifique. Pour le système {eau+calorimètre+fer}, on suppose la transformation monobare et adiabatique : $\Delta H = Q = 0$. Donc : $\Delta H = \Delta H_{eau} + \Delta H_{calo} + \Delta H_{fer} = c_{eau} \times m_{eau} \times \Delta T_{eau} + c_{eau} \times \mu \times \Delta T_{cal} + c_{fer} \times m_{fer} \times \Delta T_{fer}$.

$\mu = 29(3)$ 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 : $c_{fer} = \frac{c_{eau}(m_{eau}+\mu)(T_{eau+cal}-T_f)}{m_{fer}(T_f-T_i)} = 1016 \pm 184 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ à comparer à $c_{fer} = 449 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

II.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 thermodynamique en faisant le lien entre l'échelle microscopique et macroscopique.

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

C : Sur la vidéo, comment on fait conversion énergie mécanique et électrique ? Avec un alternateur : un aimant est entraîné par l'énergie mécanique qui crée un courant variable dans une bobine par induction. Exemple : une dynamo de bicyclette. Si pas de champs magnétiques préexistants, induction électromagnétique.

C : Dans l'énoncé du premier principe, quelles sont les particularités de A et B ? Ils sont à l'équilibre thermodynamique pour qu'on puisse leur délivrer une énergie .

C : W est le travail des forces non conservatives ? Si je prends un piston qui est bloqué par un poids, il y a le poids dans W ? Si j'ajoute une force, ça agit sur E_p par sur U (par exemple la force de Lorentz qui agit sur chaque particule ? Il est bien présent dans la partie gauche de l'équation. Si on le met à droite ça agit sur E_p et on met un signe « - ». C'est un peu indifférent de le mettre à droite où à gauche mais il ne faut pas le compter deux fois et mettre le bon signe.

C : De façon non ambiguë, peut-on mesurer une quantité de chaleur ou savoir ce que c'est ? La chaleur ça sera toute la variation d'énergie sauf le

travail des forces macroscopiques. On peut mesurer la variation d'énergie interne dans certaines conditions.

C : Si transfo quasi-statique, on peut faire $-P_e dV$. Peut-on juste dire que la transformation est réversible ? Oui ça fonctionne mais dans la vie il n'existe pas de transformation réversible.

C : Définition de réversible ? On peut changer le sens et changeant infiniment peu les contraintes extérieures. On peut prendre l'exemple d'un piston où il y a des frottements pour la différence entre réversible et quasi-statique.

C : Dans la détente Joule Gay Lussac, est-ce que c'est important que l'enceinte soit vide ou remplie d'un gaz à pression plus faible par exemple ? Il faut juste faire attention à la définition du système.

C : Si on veut une variation de chaleur δQ pour un fluide, quels sont les coefficients importants ? Il y a 6 variables calorimétriques importantes. Suivant le système, il faut prendre la dépendance en volume etc... On peut montrer qu'il n'y en a que deux d'indépendantes.

C : Différentes façon d'exprimer δQ : $\delta Q = c_v dT + l dV = c_p dT + h dP = \lambda dP + \mu dV$. On peut montrer la relation entre pente adiabatique et pente isotherme. Quelle est la pente la plus importante entre une adiabatique ou une isotherme dans le diagramme (P,V) ? Calculer la pente pour une adiabatique et une isotherme ? Isotherme : $dT = 0$ donc $\delta Q = l dV = h dP$. Adiabatique : $dV = -\frac{c_v}{l} dT$ et $dP = -\frac{c_p}{h} dT = \frac{c_p l}{h c_v} dV$.

C : Comment exprimer de manière générale dP en fonction de dT et dV à partir d'une équation d'état ? $dT = (\frac{\partial T}{\partial P})_V dP + (\frac{\partial T}{\partial V})_P dV$. On en déduit

C : Dans le diagramme (P,V), on considère des transformations infinitésimales entre A et D (entre A et B : isochore, B et C : isobare, C et D : isotherme et entre D et A : isobare). Calculer la variation infinitésimale δQ sur le cycle en commençant d'abord par les chemins A-B-C et A-D-C. Sur A-B-C : $\delta Q = \lambda dP + \mu dV$. Sur A-D-C, $\delta Q = c_p dT + h dP$. Donc sur le cycle : $\delta Q = -\delta W = \lambda dP + \mu dV - c_p dT - h dP$.

Commentaires lors de la correction de la leçon

Très bonne leçon. Basile : je n'aurai pas du tout évoquer le terme chaleur.
Pour l'expérience, on aurait pu faire l'inverse en faisant chauffer la barreau de fer et mettre de l'eau à température ambiante. Il y aurait peut-être moins de pertes.
Tu as parlé moins vite et c'était mieux par rapport à la dernière fois.
Pas de forces à longue portée pour que U soit extensive.

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) :

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates :

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) :

Bibliographie conseillée :

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) :

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates :

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) :

Bibliographie conseillée :

Leçon 7

Transition de phase

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Thermodynamique	BFR	Dunod	
Thermodynamique	Diu		
Physique Spé PC/PC*	S. Ollivier, H. Gié, J-P Sarmant	tec&Doc (2000)	
https://www.lkb.upmc.fr/boseeinsteinsoncondensates/ wp-content/uploads/sites/10/2017/10/CoursThermo2017.pdf	Jérôme Beugnon		
Dictionnaire de Physique	R. Taillet	deBoeck (2018)	

Commentaires des années précédentes :

- **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.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Licence 3

Prérequis :

- Potentiels thermodynamiques, coefficients calorimétriques,
- Variance, règle des moments
- aimantation, susceptibilité magnétique

Déroulé détaillé de la leçon :

Introduction

La notion de phase paraît assez naturelle si on prend l'exemple de l'eau. La glace, la vapeur et l'eau liquide sont toutes trois des phases dans lequel l'arrangement des molécules d'eau n'est pas du tout la même d'une phase à une autre.

Sur slide : on peut prendre la définition de Taillet p559 : arrangement des constituants d'un milieu dans lequel les propriétés mécaniques, thermodynamiques, électriques et magnétiques varient continûment.

On va dans cette leçon essayer de décrire ce qu'il se passe thermodynamiquement lorsqu'on passe d'une phase à une autre en prenant appui pour commencer sur la transition liquide-vapeur de l'eau.

I Description de la transition liquide-vapeur

I.1 Diagrammes de phase (P,T) et (P,V)

Construire comme les diagrammes (P,T) et (P,V). Diu p297 : transformation à température constante. On a une enceinte avec un piston mobile. On considère une transformation quasi-statique et isotherme. On voit apparaître à une certaine pression P_S du liquide qu'on définit comme la pression de vapeur saturante. Si on continue à appuyer, la pression reste constante jusqu'à ce que tout le gaz se soit transformer en liquide. Si on répète la même expérience à une température différente, la pression P_S va changer.

Manip qualitative : Tracer des isothermes de SF₆.

On constate un pallier de liquéfaction qui permet de remonter à la composition du système en liquide ou en vapeur par la règle des moments. Définir les courbes

de rosée et d'ébullition.

Il existe une certaine température pour laquelle on n'aura plus de pallier de liquéfaction : c'est la température critique. (T_c , P_c) définit le point critique du fluide pour lequel le fluide reste homogène pour toute variation du volume .

Pour passer d'un point à un autre sur le diagramme (P,T), on peut utiliser le bouillant de Franklin https://www.youtube.com/watch?v=nxAQ_8tC1U. 1-2) on évapore à P_{atm} jusqu'à 100°, 2-3) on bouche le bouilleur P augmente, on se déplace sur $P_s(T)$, 3-4) plus d'ébullition T diminue à pression cste, 4-5), on verse de l'eau froide qui diminue P (et T aussi sans doute), le système peut retrouver $P_s(T)$ et on voit l'eau bouillir.

Parler de la surfusion ou surébullition ?

Transition : Comment décrire thermodynamiquement ce qui se passe au niveau de ce changement d'état ? Comme on travaille à P ou T variable, on va utiliser l'enthalpie libre $G = U + PV - TS$.

I.2 Enthalpie libre d'un corps pur sous deux phases

Suivre Tec&Doc à partir de p294. On considère deux phases différentes d'un même corps pur dans un récipient maintenu à T et P par contact avec l'atmosphère extérieure et un thermostat.

Condition d'équilibre et d'évolution sur slide.

$V = V_1 + V_2$, $U = U_1 + U_2$, $S = S_1 + S_2$ on a donc $G = U + PV - TS = G_1 + G_2 = n_1g_1 + n_2g_2$.

Comme on travaille à $n = n_1 + n_2$ fixé, on peut réécrire l'enthalpie comme une fonction dépendant de n_2 T, P : $G(T, P, n_2) = (n - n_2)g_1(T, P)$. Montrer dans le cas

I.3 Chaleur latente liquide-gaz

Définition Diu p324. **Manip quantitative** : mesure de la chaleur latente de vaporisation de l'eau. On a besoin :

- alternostat,

- deux multimètres METRIX pour mesures de V et I,
- balance électronique,
- thermoplongeur,
- potence + noix
- fils électriques,
- récipient DEWAR,
- chronomètre,
- thermomètre,

Brancher l'alternostat par des fils à l'alimentation du thermoplongeur.

Démontrer la formule de Clapeyron et ses conséquences Tec&Doc p298-300.

Transition : Faire le lien entre le passage au point critique de l'eau où l'enthalpie de changement d'état est nul et la transition du second ordre.

II Modèle de Landau pour la transition ferro-paramagnétique

Voir Diu p213.

II.1 Description de la transition

Vidéo pour la température de Curie : <https://www.youtube.com/watch?v=haVX24h0wQI>

A $T > T_c$ (température de Curie), on a $\langle M \rangle = 0$. Mais à $T \leq T_c$, on a $M \neq 0$.
Odg : Fer : $T_c = 1043$ K, cobalt : $T_c = 1388$ K.

M est une fonction continue de la température et est un paramètre qui mesure l'ordre (magnétique) du système : on l'appelle par ailleurs le paramètre d'ordre. Landau associe à toutes les transitions de phases du second ordre un paramètre d'ordre continu.

II.2 Enthalpie libre associée

Déterminer $G(T)$ avec le modèle de Landau **u voisinage de la transition !!**
Si pas le temps, donner directement les arguments :

$$\frac{\partial G}{\partial M_T} = 0 \quad (7.1)$$

$$\frac{\partial^2 G}{\partial^2 M_T} > 0 \quad (7.2)$$

Puis donner la forme de G obtenue et représenter graphiquement pour $T > T_c$, $T = T_c$ et $T < T_c$.

II.3 Evolution de grandeurs thermodynamiques

Montrer que $S(T)$ est continue mais que $C_V(T)$ et/ou $\chi(T)$ sont discontinues au voisinage de la transition. C'est une caractéristique des transitions de phase du second ordre : les dérivées secondees de l'énergie du système sont discontinues au voisinages de la transntion.

Problème : l'accord $\chi \propto (T - T_c)^{-1}$ avec l'expérience n'est pas la : cela vient du fait

Conclusion

Exposants critiques à la transition : notion d'universalité. Classification des transitions de phases : ehrenfest et Landau (voir Diu p649)

Leçon 8

Phénomènes de transport

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Thermodynamique	BFR	Dunod (1989)	
Thermodynamique	Diu		
Tout-en-un PC/PC*	M.-N. Sanz	Dunod (2022)	
Ondes mécaniques et diffusion	Christian Garing	Ellipses (1998)	

Commentaires des années précédentes :

- **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

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Prépa deuxième année

Prérequis :

Introduction

Les principes de la thermodynamique utilisent la notion de fonction d'état qui permettent de décrire les transformations entre deux états d'équilibre sans se soucier du chemin qu'emprunte le système au cours de cette transformation. On va ici lever l'hypothèse de l'équilibre thermodynamique et on va s'intéresser à décrire le transport de quantité physiques comme la quantité de matière ou la température par exemple avant que le système atteigne macroscopiquement son équilibre ou qu'on lui impose des conditions aux limites.

Manip qualitative : Mettre une goutte de sirop coloré dans de l'eau.

Expérience qualitative : Barreau chauffé + caméra thermique.

I Equilibre thermodynamique local (max 10min)

I.1 Système hors équilibre

Cf Sanz Dunod p120. En première année, on définit 3 échelles de longueur :

- échelle microscopique : taille caractéristique $\delta =$ distance moyenne entre deux particules pour liquide/solide, libre parcours moyen pour un gaz
- échelle macroscopique : taille L typique de système étudié
- échelle mésoscopique : échelle intermédiaire de taille d telle que $\delta \ll d \ll L$.

Interpréter les expériences avec ces 3 trois échelles. La température de l'eau fait chauffer les barreaux, il y a un gradient de température qui se fait de la zone la plus chaude à la zone la plus froide. De même, il y a une propagation des molécules de sirop des zones de forte à faible concentration de ces molécules.

La température n'est pas la même sur toute la longueur des barreaux comme la densité de molécules dans le verre d'eau. Cependant on peut quand même définir sur des zones de faibles épaisseurs (faibles devant l'échelle de variation caractéristique de la température du barreau, ici par exemple une ligne horizontale de pixels) les variables d'états de la thermodynamique (température, pression, densité de particule, ...).

I.2 Equilibre thermodynamique local

Décrire des volumes mésoscopiques dans un volume macroscopique. D'après Diu p464 : [slide](#) : "lors d'un processus hors équilibre, il y a équilibre thermodynamique local si tout sous-système macroscopique infinitésimal (ou volume mésoscopique) peut-être regardé comme ayant atteint l'équilibre thermodynamique ". Une variable d'état Y peut donc être définie localement $Y(M, t)$ en un point M du système macro, à l'instant t. Hypothèse valable si le déséquilibre « n'est pas trop » c'est-à-dire :

- l'équilibre thermo local règne partout dans le système,
- les écarts à l'équilibre sont suffisamment faible pour qu'on puisse les traiter au premier ordre : [approximation linéaire](#)

Comment peux-t-on décrire physiquement la variation des variables d'états ?

I.3 Flux et courants

[Définition](#) : Le flux, noté $\Phi(t)$, il s'agit d'un débit (de particules, d'énergie, de charges, ...) à travers une surface \mathcal{S} à l'instant t. Il est relié au vecteur densité de courant \mathbf{j} dont le flux (au sens mathématique) à travers cette surface est :

$$\Phi = \iint_{M \in \mathcal{S}} \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S}_M \quad (8.1)$$

Note : c'est une grandeur algébrique, positive si le courant rentre dans le système, négative s'il sort.

Transition : Maintenant qu'on a décrit le cadre physique pour décrire un phénomène de transport, on va l'appliquer dans un cas précis. J'ai choisi dans cette leçon de traiter le phénomène de diffusion de particules (le sirop dans l'eau).

II Diffusion de particules

II.1 Loi de conservation

Sans production ou disparition de particules, faire un bilan :

- soit global p94 Dunod 2016 et utiliser le théorème de Green-Ostrogradsky pour avoir la loi locale

- soit local à une dimension proprement (de préférence)
- Expliquer qu'on décrit le transport de grandeurs **extensives et conservées**.

II.2 Loi de Fick (1855)

On a (comme pour le courant de charge en électromag) :

$$\mathbf{j}(M, t) = n(M, t)\mathbf{v}(M, t) \quad (8.2)$$

Problème, on retrouve avec une équation pour 4 inconnues (n , j_x , j_y et j_z). Il manque une équation vectorielle. Enoncer la loi phénoménologique de Fick qui se constate expérimentalement :

$$\mathbf{j}(M, t) = -D\text{grad}n(M, t) \quad (8.3)$$

avec D le coefficient de diffusion (en $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$). On note le signe « - » devant le gradient qui s'explique naturellement par les expériences du début.

Donner le tableau odg ([slide](#)) cf Dunod p96.

II.3 Equation de diffusion

(Démo possible p533 Diu) On trouve :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \quad (8.4)$$

$t \longleftrightarrow -t$ change l'équation : irréversibilité du phénomène de diffusion (déjà présent dans la loi de Fick).

Analogie : effet de peau dans un conducteur (équation de Maxwell-Ampère dans un plasma), diffusion de la quantité de mouvement et de vorticité au sein des fluides visqueux (faible nombre de Reynold).

II.4 Mesures du coefficient de diffusion eau-glycérol

Cf calcul compo 2002 agrégation standard partie D p14.

II.5 Interprétation microscopique de la diffusion de particule (bonus)

Cf Christian Garing p228-229 + code Python pour la diffusion p101 Dunod.

III Correspondance avec d'autres phénomènes de diffusion

Faire un tableau. Critiquer loi d'Ohm qui provient d'une interaction des charges à longue portée, pas d'un mouvement brownien.

Conclusion

Ouvrir sur le transport de plusieurs grandeurs couplées (effets thermoélectriques mais c'est chaud voir p515-521 Diu)

Leçon 9

Conversion de puissance électromécanique

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
TP Moteur		Site aggreg Montrouge	
Cours Jérémie Neveu	J. Neveu	Site aggreg Montrouge	
Tout-en-un PSI/PSI* (Chap 27 et 28)	S. Cardini	Dunod (2022)	

Commentaires des années précédentes :

- **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,
- 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.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon :

Prérequis :

Introduction

Parler de l'intérêt dans la vie de tous les jours :

- Conversion mécanique - électrique : ex : éolienne, production d'électricité, courants de Foucault
- Conversion électrique - mécanique : moteur, haut-parleur, freinage par courants de Foucault

I Principe de la conversion

I.1 Exemple du rail de Laplace

Faire le schéma en faisant attention à la convention d'orientation : choisir U et I, le reste c'est avec le bonhomme de Maxwell la règle de la main droite.

Neutralité du conducteur : $\rho_{e^-} = \rho_{ions}$ implique que la force de Lorentz s'écrit comme la force de Laplace $d\mathbf{F}_L = \mathbf{j}d\tau \wedge \mathbf{B} = I\mathbf{dl} \wedge \mathbf{B}$.

I.2 Bilan de puissance

Puissance mécanique : $dP_L = d\mathbf{F}_L \cdot \mathbf{v} = -I(\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}) \cdot \mathbf{dl}$. Comme le champ électromoteur s'écrit par définition : $\mathbf{E}_m = \mathbf{v} \wedge \mathbf{B} - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$, et la force électromotrice s'écrit $e = \mathbf{E}_m \cdot \mathbf{dl}$, on a en régime permanent la relation fondamentale de conversion de puissance électromécanique :

$$dP_L = -Ide \Rightarrow P_L + P_e = 0 \quad (9.1)$$



I est dans le sens de **dl**

I.3 Interprétation

Deux cas de figure :

- Pour un circuit électrique mobile dans un champ B permanent, si de la puissance électrique est fourni au circuit via des phénomènes d'induction ($P_e > 0$) alors la même puissance est retirée du système mécanique ($P_L < 0$). Par exemple, les moteurs.
- Si de la puissance est fourni au système mécanique via des forces de Laplace ($P_L > 0$) alors la même puissance est retirée du système électrique via des phénomènes inductifs ($P_e < 0$). Par exemple : les alternateurs dans les éoliennes/centrales électrique pour produire de l'électricité.

Transition : On va étudier dans une deuxième partie le principe du moteur à courant continu.

II Moteur à courant continu

Cf cours de Jérémie.

Intérêt : commander la vitesse de rotation de l'arbre du moteur par la tension qu'on lui impose. Utilisé pour les moteurs de faibles puissance (jusqu'à une centaine de kW).

II.1 Structure

Expérience qualitative : Montrer le MCC de la collection. Décrire le stator, rotor, collecteur-balais. Schéma à une spire (cf Cours Jérémie Neveu).

Arriver sur les relations fondamentales du MCC :

$$E = K\Phi_S \Omega \quad (9.2)$$

$$\langle \Gamma(t) \rangle = K\Phi_S I_R \quad (9.3)$$

II.2 Etude du MCC

Avantage du moteur synchrone : réversible (si mode générateur : alternateur)

Attention : utiliser des multimètres métrix, poids de 100g à 5kg (x2 à chaque fois). Pied à coulisse pour r , chrono pour mesure Ω à la main, typiquement v stable pour $\Delta x = 10$ cm (cf tracker).

Manip 1 : Déterminer K_{em} la résistance du moteur et la comparer à la valeur donnée dans la notice. Je trouve $K_{em} = 1.30(2)$ V.rad.s⁻¹.

Manip 2 : Tracer η en fonction de la puissance utile et comparer à charge nominale = 2kg et $\eta_{nom} = 50\%$. Le courant lu est assez critique, ne pas hésiter à refaire plusieurs fois.

Bonus : Montrer la réversibilité du moteur avec une charge lourde pour voir apparaître une tension lors de la descente. **Transition** : Nous voyons bien que nous n'avons pas un rendement de 100%, il y a des pertes.

II.3 Bilan de puissance

Faire schéma fonctionnement du moteur (cf Tout-en-un PSI/PSI* p818).

- Pertes cuivre : effet Joule dans les conducteurs constituant les bobinages de la machine,
- Pertes fer : puissance dissipée par le parcourt du cycle d'hystérésis des aimants en fer doux + puissance dissipée par effet Joule par les courants de Foucault

Transition : Ces moteurs sont aujourd'hui mis en concurrence par les moteurs à courant alternatif dont nous allons détailler le fonctionnement pour les moteurs synchrones

III Machines synchrones

III.1 Génération d'un champ magnétique tournant (bonus ?)

III.2 Champ rotorique et champ statorique

III.3 Point de fonctionnement et stabilité

Ouverture

Moteur asynchrone.

Leçon 10

Induction électromagnétique

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Electromagnétisme 3 : magnétostatique, induction, équations de Maxwell et compléments électroniques	M. Bertin, J. P. Faroux, J. Renault	Dunod Université (1986)	2-04-016916-4
Physique Spé. MP*, MP et PT*, PT	Hubert Gié, Jean-Pierre Sarmat, Stéphane Olivier, Christophe More	Editions Tec & Doc (2000)	2-7430-0398-7
Physique Spé. PSI*, PSI	Stéphane Olivier, Christophe More, Hubert Gié	Editions Tec & Doc (2000)	2-7430-0399-5
Electromagnétisme 2ème année	J.M Brébec	HPrépa (2004)	

Commentaires des années précédentes :

- **2015** : L’algébrisation rigoureuse des grandeurs électriques et mécaniques est nécessaire lors de la paramétrisation,
- **2014** : Dans cette leçon, le plus grand soin s’impose dans la définition des orientations et des conventions de signe. Les applications doivent occuper une place significative dans la présentation. Il n’est pas admissible à ce

niveau de confondre les forces de Lorentz et de Laplace.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Licence 3

Prérequis :

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

Déroulé détaillé de la leçon :

Introduction

Nous allons voir dans cette leçon que les phénomènes d'induction sont contenus dans les équations de Maxwell et dans la force de Lorentz qu'on a déjà vu. Ils nécessitent qu'on s'y attarde du point de vue des conséquences pratiques qu'ils mettent en exergue. Dans toute la leçon, nous travaillerons dans le cadre de l'ARQS magnétique (i.e. qu'on néglige le courant de déplacement $\mathbf{j}_D = \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ dans les équations de Maxwell).

Historiquement : Oersted (1820) : courants électriques induisent \mathbf{B} . Faraday (1831) : Variations de \mathbf{B} qui induisent des courants électriques.

I Phénoménologie de l'induction

I.1 Mise en évidence expérimentale

Expérience qualitative 1 : 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} . De plus, on voit que dans un sens on a une fem positive et dans l'autre une fem négative. Permet de connaître le pole Nord ou le pole Sud d'un aimant par exemple.

Définition phénoménologique de l'induction (slide) apparition d'une f.e.m et, s'ils peuvent s'écouler, de courants, dans un conducteur mobile placé d'un champ magnétique variable.

Deux cas particuliers :

- Dans le cas où on a un circuit fixe et un champ variable, on parlera d'induction de Neumann,
- Dans le cas où on a un circuit déformable ou mobile dans un champ magnétique stationnaire, on parlera d'induction de Lorentz

I.2 Loi de Faraday et loi de modération de Lenz

4min20

Définition du flux : $\phi = \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$. Attention à la convention d'orientation de la surface par rapport au circuit (règle de la main droite) ;

Loi de Faraday :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (10.1)$$



Validité : circuits filiformes sinon on ne peut pas définir de flux magnétique

Unités de e (v) et ϕ (Wb ou T.m²) Convention générateur de la f.e.m. : la force électromotrice est dans le même sens que l'intensité.

[expérience qualitative 2](#) : chute d'un aimant dans un conducteur.

Loi de Lenz : discussion du signe – dans la loi de Faraday.

Transition : On va voir qu'on peut formaliser l'induction à l'aide d'une approche microscopique.

II Théorie de l'induction

6min10

II.1 Définition formelle de la fem

Voir Tec&Doc PC p617. La tension électromotrice s'exprime de la manière suivante :

$$e = \frac{1}{q} \oint_C \mathbf{F}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{l} \quad (10.2)$$

où C est un contour orienté et fermé et \mathbf{F} une force proportionnelle à la charge. La fem représente donc le quotient de la circulation de cette force le long de ce contour pour la charge.

En utilisant la force de Lorentz dans un référentiel R du laboratoire supposé galiléen : $\mathbf{F} = -e(\mathbf{E} + \mathbf{v}_R \wedge \mathbf{B})$, où \mathbf{v}_R est la vitesse des électrons dans ce référentiel, on obtient :

$$e = \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} + \oint_C (\mathbf{B} \wedge \mathbf{v}_R) \cdot d\mathbf{l} \quad (10.3)$$

On voit que si le circuit de contour C est fixe, $\mathbf{v}_R // d\mathbf{l}$ donc le second terme est nul : c'est l'induction de Neumann.

II.2 Induction de Neumann

Le champ électrique \mathbf{E} s'écrit de manière générale à partir des potentiels scalaire et vecteur :

$$\mathbf{E} = -\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (10.4)$$

Ce qui implique que ($\text{grad}V$ est à circulation nulle sur un contour fermé) :

$$e = \oint_C \mathbf{E}_m \cdot d\mathbf{l} \quad (10.5)$$

ou $E_m = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$ est appelé le **champ électromoteur de Neumann**. On retrouve la loi de Faraday en disant que $\oint_C \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = \int \int_{\Sigma} \mathbf{B}(\mathbf{t}) \cdot d\mathbf{S} = \phi(t)$.

II.3 Induction de Lorentz

Schéma p626 Tec&Doc PC/PC*. A voir s'il y a le temps ou alors donner les grandes lignes sur slide.

On se place dans un cadre non relativiste et on prend un circuit filiforme ou le circuit est animé d'une vitesse \mathbf{v}_e et la vitesse des électrons dans le référentiel

galiléen du labo est $\mathbf{v}_R = \mathbf{v}_r + \mathbf{v}_e$, avec $\mathbf{v}_r // d\mathbf{l}$.

Comme on est en régime stationnaire : $\mathbf{E} = -\nabla V$. On en déduit la tension électromotrice :

$$e = \oint (\mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \quad (10.6)$$

Le terme $\mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B}$ se substitue au champ électromoteur de Neumann.

Le produit mixe permet d'écrire :

$$e = \oint (d\mathbf{l} \wedge \mathbf{v}_e) \cdot d\mathbf{B} \quad (10.7)$$

Voir Hprépa p179. Le produit vectoriel $d\mathbf{l} \wedge \mathbf{v}_e$ a pour norme l'aire balayée $d\mathbf{S}_b$ par l'élément de circuit $d\mathbf{l}$ qui va à la vitesse \mathbf{v}_e pendant dt et donc l'intégral représente le flux de \mathbf{B} à travers cette surface. Le champ \mathbf{B} étant à flux conservatif, son flux à travers la surface totale Σ_{tot} fermée est nul et donc (attention aux signes ! de S_b en particulier) :

$$\oint_{\Sigma_{tot}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = -\phi(t + dt) + \phi(t) - \oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}_b \quad (10.8)$$

$$-\frac{d\phi(t)}{dt} = e(t) \quad (10.9)$$

On retrouve bien la loi de Faraday.

Conclusion orale : Dans le cas général, on a la somme des deux cas (Neumann et Lorentz). On peut passer d'une vision à une autre par changement de référentiel (exemple avec la première expérience qualitative).

Transition : Maintenant qu'on a bien tous les outils théoriques pour décrire et comprendre l'induction, on va revenir à un aspect pratique.

III Aspects pratiques

15min30

Bien insister dans cette partie sur l'aspect fondamentalement pratique de l'induction.

Au choix :

- conversion de puissance électromécanique (voir Cours Jérémie Neveu),

- transformateur,
- roue de Barlow (historique) voir Tec&Doc
- frein d'induction pour les trains ou les poids lourds (voir Hprépa)

III.1 Auto-induction

Voir Hprépa. 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 : Mesure d'une inductance L :

- un L fixe (ne pas prendre bobine Leybold)
- oscilloscope Keysight GOX
- GBF,
- câbles bananes, BNC-bananes,
- résistance
- multimètre Metrix,
- LCR-mètre,
- transformateur d'isolement (évite les problèmes de résistance du GBF)

Circuit RL, mesure du temps caractéristique sur oscilloscope avec le temps de réponse à 63%.



Ne pas oublier les résistances de la bobine et des câbles

26min

III.2 Inductance 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 : $\phi_{12} = M_{12}i_2$;

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

Modèle simple de transformateur (schéma sur slide). Secondaire en circuit ouvert ($i_2 = 0$). Loi des mailles (en complexe) donne : $M = L_1 \left| \frac{U_2}{e_g} \right|$.

Conclusion

Applications diverses (on a vu bobines et transformateurs).

Autres applications (slide) : Plaques à induction, Feinage par induction.

Parler de la détection RMN que j'ai réalisé en thèse. 39min12

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

C : Revenir sur la toute première manip (aimant+bobine). Peut-on remonter directement au flux ϕ ? Oui en faisant l'intégrale de la tension sur un aller à l'oscilloscope. Par ailleurs, on peut diviser le nombre de spire par deux et voir que la tension est également divisée par deux. Peut-on retrouver que c'est une tension négative en premier et positive en deuxième? Il faut connaître dans quel sens est orienté le bobinage de 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.

C : Symbole du Weber ? Wb, ce sont des $T.m^{-2}$.

C : Dans la loi de Faraday, vous avez dit que e doit être orienté suivant le sens du courant. Pourtant il n'y a pas de courant à la base car c'est la fém qui induit le courant (s'il peut circuler)? On choisit une convention d'orientation du circuit. Celle-ci nous impose l'orientation de la surface du flux sortant. La fém est alors **dans le sens de l'orientation du circuit**. Enfin, si le courant peut circuler, pour $e > 0$, le champ de force tend à faire circuler les porteurs de charge positive dans le sens positif du circuit, c'est-à-dire à produire une intensité $i > 0$ (on rappelle que le sens de circulation du courant est par convention inverse au sens de circulation des électrons).

C : Peut-on prendre la surface du circuit filiforme pour calculer le flux de B ? Oui car le flux est indépendant du choix de la surface (il faut par contre que celle-ci s'appuie sur le contour défini par le circuit).

C : Pourquoi la manip avec le tube est une illustration de la loi de Lenz ? Le mouvement de chute est freiné par la force de Laplace créée par les courants induits dans le conducteur : la force s'oppose donc au mouvement qui lui a donné naissance. Peut-on retrouver que la force doit être opposée au mouvement avec la loi de Faraday ? Oui, on peut voir le conducteur cylindrique comme une superposition de spires infiniment fines et faire le raisonnement avec la loi de Faraday sur chacune des spires et sommer le tout.

C : Dans quel cas un fil peut-être considéré comme filiforme (pour la validité de la loi de Faraday) ? Si la largeur du fil est petite devant la taille caractéristique de variation du champ magnétique (alors le champ magnétique est quasi-constant dans le volume).

C : Quelle est le cadre de l'ARQS magnétique ? L'ARQS revient à négliger le temps de propagation des quantités électromagnétiques. Si T est le temps typique de variation des champs \mathbf{E} et \mathbf{B} et L la distance typique entre les sources et le champ électromagnétique observé alors l'ARQS est valable si $T \gg \frac{L}{c}$. Si de plus $|\mathbf{j}| \gg |\rho c|$, on est dans l'ARQS **magnétique**. Odg : pour un circuit $L \sim 1\text{m}$, on doit avoir $f = \frac{c}{T} \ll 10^{14} \text{ Hz}$.

C : Y-a-t'il une raison pour laquelle on associe la fem à une tension autre que l'homogénéité de son unité ? Par exemple, si je n'ai que un champ électrique, $\frac{\mathbf{F}}{q} = \mathbf{E}$ et $e = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$: c'est la tension. On a bien une force qui met en mouvement les électrons, ce qui ressemble à ce que fait une tension électrique, c'est comme un générateur.

Par ailleurs, on peut retrouver à partir de la loi $W = \oint \mathbf{F}(\mathbf{r}, t) \cdot d\mathbf{l}$ la loi d'Ohm généralisée en électrocinétique.

C : Vous avez obtenu la fem dans le cadre de Neumann, quid dans le cas de Lorenz ? On prend un circuit filiforme orienté dont chaque élément $d\mathbf{l}$ subit un déplacement $d\mathbf{r}$ (on suppose que l'orientation du circuit ne change pas au cours du temps). On a $e = \oint \mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$ avec $\mathbf{v}_e = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$ la vitesse d'entrainement des électrons par déplacement due au déplacement du circuit au cours de dt . Par permutation circulaire du produit vectoriel avec le produit scalaire, on a : $(\mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} = -\frac{1}{dt}(\mathbf{B} \cdot d^2S_c) = -\frac{d^2\phi_c}{dt}$ où on a introduit $d^2\mathbf{S}_c = d\mathbf{l} \wedge \mathbf{v}_e$ l'aire balayée pendant dt par le déplacement du conducteur et $d\phi_c \equiv \mathbf{B} \cdot d^2\mathbf{S}_c$ le flux "coupé" (flux du champ magnétique à travers d^2S_c , "coupé" car lors

de son déplacement, l'élément de conducteur "coupe" les lignes de champs magnétiques). Enfin, en utilisant l'équation de Maxwell-Flux, on peut montrer que pour un champ magnétique stationnaire, $\oint d^2\phi_c = d\phi$, nous permettant de retrouver la loi de Faraday.

C : À t-on toujours une fem dans le cas où le circuit se déplace ? Si le circuit se déplace sans déformation, la variation de flux magnétique est nulle ($\phi(t + dt) = \phi(t)$) et donc $e = 0$.

C : Pourquoi la manip n'a pas marché pour la mesure de l'inductance ? Mesure mal faite, on a trouvé la bonne valeur quand elle a été refaite pendant la séance de question.

C : Est-ce que la bobine peut créer une inductance mutuelle sur le circuit électrique et donc modifier l'inductance du circuit ? C'est possible en théorie, elle est d'autant plus importante que le circuit est grand car l'inductance mutuelle est proportionnelle à la surface d'intégration. Est-ce que c'est valable pour un solénoïde infini ? Non car le champ est nul à l'extérieur de la bobine.

C : Retour sur la manip de l'inductance mutuelle ? Quelle est l'influence du fer doux ? Il canalise les lignes de champs dans les bobines, cela permet d'avoir un champ plus fort. Pourquoi la tension n'est pas sinusoïdale à la sortie de la bobine alors que celle à l'entrée l'est ? Les inductances propres et mutuelle peuvent dépendre des courants induits. Ces courants dépendent de la réponse du fer doux à une excitation magnétique qui n'est pas linéaire avec le champ. Cela entraîne donc des non-linéarités du courants et donc de la fem en sortie.

C : Quel instrument permet de mesurer beaucoup mieux la tension crête à crête ? Un voltmètre en configuration AC.

C : Contrairement à L , M est algébrique. Qu'est-ce que ça veut dire ? M dépend des conventions d'orientation des circuits. L est toujours positive car changer l'orientation du circuit change l'orientation du courant d'une part, et celui du vecteur surface donc du flux d'autre part, de sorte que L reste toujours positive.

C : Pourquoi il y a-t'il un déphasage dans le signal de sortie de la manip de mesure d'inductance ? Le circuit est un filtre passe-bas d'ordre 1, la fréquence de travail induit un déphasage dans la réponse du système qui vaut 0 pour $\omega = 0$ et

$-\pi/2$ pour $\omega \rightarrow \infty$.

Leçon 11

Rétroactions et oscillations.

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Tout-en-un PSI/PSI*	Cardini	Dunod	
Physique Spé. PSI/PSI*	Olivier, More, Gié	Tec&Doc	
Cours	Jérémy Neveu		
Physique PSI/PSI*	S. Cardini	Dunod (2020)	

Commentaires des années précédentes :

- **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,
- **2013** : Le jury n'attend pas une présentation générale et abstraite de la notion de système bouclé.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : PSI

Prérequis :

- Electrocinétique : filtres du 1er et 2nd ordre, diagramme de Bode
- Mathématique : équations différentielles linéaires d'ordre 1 et 2,
- ALI en régime linéaire, montage non inverseur, soustracteur, additionneur,
- induction (pour MCC)
- transformée de Laplace ?

Déroulé détaillé de la leçon :

Introduction

Manip qualitative introductory : MCC asservi (maquette régulation de vitesse) + Oscilloscope + GBF + N fils bananes + N fils BNC. Prendre l'exemple de l'escalator. Discuter :

- asservissement idéal : vitesse = celle de l'entrée = constante même avec des gens dessus (tension de consigne = tension d'entrée, critère de précision),
- réponse rapide lorsqu'il y a une personne qui se met sur le tapis (temps de réponse du système, critère temporel),
- réponse ne dépasse pas la vitesse de commande pour ne pas avoir dà coup,
- critère d'énergie à fournir, etc.

Faire varier les corrections et le cas frottements/pas frottements.

Finalement on se retrouve dans la plupart des cas à devoir répondre à un cahier des charges plus où moins strict. La problématique de l'asservissement est un des critère du cahier des charges qui fait intervenir une notion importante : la notion de système bouclé. Cette notion peut être défini ailleurs qu'en physique voir Tec&Doc p65 (économie avec les prix, biologie avec le corps humain) mais on va rester en électronique :).

I Notion de rétroaction : commande d'un système

Définition : une rétroaction est la réintroduction du signal de sortie d'un système à l'entrée de ce système.

I.1 Système bouclé

Présenter sur slide le schéma fonctionnel.

On définit :

- la fonction de transfert de la chaîne direct A : dans le cas de la manip introductory correspond à l'ensemble correcteurs+amplificateur+suiveur de puissance (voir notice),

- la fonction de transfert de la chaîne de retour $\underline{\beta}$ qui dans le cas de la manip introductive était un tachymètre. C'est souvent justement un capteur (photodiode pour asservir la lumière, sonde à effet hall pour le champ, etc),
- un comparateur (le plus souvent un soustracteur pour l'asservissement) qui renvoie une erreur $\epsilon = \underline{e} - \underline{\beta}\underline{s}$ est appelé signal d'erreur.

Le signal d'entrée e et le signal de sortie s sont reliés entre eux par une fonction de transfert. Si le système est ouvert en sortie de la rétroaction, alors on appelle FTBO :

$$FTBO = \frac{\underline{r}}{\underline{e}} = \underline{A}\underline{\beta} \quad (11.1)$$

Si le système est fermé sur la sortie (un dipôle par exemple), alors on définit la FTBF :

$$FTBF = \frac{\underline{s}}{\underline{e}} = \frac{\underline{A}}{1 + \underline{A}\underline{\beta}} \quad (11.2)$$

I.2 Exemple : ALI non inverseur

Voir P. Olive p120 ou Dunod p47. Mettre sur slide le schéma-bloc. Faire les calculs (bien fait dans le Dunod p46). Mettre la fonction de transfert sous forme canonique. Un montage à amplificateur opérationnel se met sous la forme d'un système bouclé, avec comparateur. Tracer son diagramme de Bode. Parler du produit gain-bande passante :

$$(1 + \frac{R_2}{R_1}) \frac{1}{\tau_{BF}} = \frac{A_0}{\tau} = cste \quad (11.3)$$

Autrement dit, plus on amplifie, moins la bande passante est importante et réciproquement. Il y a donc un compromis à trouver selon les utilisations !

I.3 Caractéristiques d'un asservissement

On peut parler de :

- précision : différence entre l'entrée et la sortie en $t \rightarrow \infty$ (erreur statique), ou erreur avec laquelle la sortie suit la consigne imposée au système (erreur dynamique)
- rapidité : temps au bout duquel le système atteint son régime permanent (pour lexemple de l'ALI non inverseur, c'était τ_{BF} donc plus la bande passante est large, plus le système réagit rapidement,

- stabilité du système : la réponse reste bornée

Propriété : de manière générale, il ya une compétition entre rapidité et stabilité. Explication avec les mains : plus un système va vite, plus il a de chance de dépasser la consigne, le système va suréagir et l'entraîner encore plus loin.

Le critère de stabilité nécessite qu'on le détail dans la partie suivante.

II Stabilité des systèmes

Tec&Doc p75. **Critère de stabilité :** Un système bouclé évoluant en régime libre (entrée nulle), au voisinage de son équilibre (sortie nulle) sera dit **stable** si l'évolution de la sortie tend spontanément vers l'équilibre $s \rightarrow 0$, **instable** dans le cas contraire.

II.1 Cas des systèmes d'ordre 1 et 2

Voir Tec&Doc p71 ou J. Neveu. Poser l'équation différentielle à la sortie en régime libre (entrée nulle) pour $A = \frac{A_0}{1+jt/\tau_0}$ (fonction de transfert 1er ordre) et $\beta = \beta_0$ (gain simple). La solution générale est

$$s(t) = S_0 e^{-t/\tau'} \quad (11.4)$$

avec $\tau' = \frac{\tau_0}{1+A_0\beta_0}$. L'appliquer à un ALI en montage non inverseur (au programme PSI) et expliquer pourquoi ce n'est pas stable si on inverse les bornes + et - (devient un comparateur à hystérésis), cela revient à inverser le signe de μ_0 .

On peut montrer la même chose avec un système d'équation différentielle d'ordre 2 (à voir si redémonstration au tableau ou sur slide). On retient :

- les systèmes d'ordre 1 et 2 sont stables si tous les coefficients de l'équation différentielle régissant $s(t)$ sont de même signes

II.2 Cas des systèmes bouclés

Voir J. Neveu. (oscillateurs). Montrer le tableau transformée de Laplace, évolution temporelle du signal. Reprendre la fonction de transfert, établir que si :

- $A\beta$ possède des parties réelles négatives alors le système est stable.
- $A\beta$ possède des parties réelles nulles alors le système est oscillant.

- $A\beta$ possède des parties réelles positives alors le système est instable.

Transition : on va voir justement une application de ces conditions de stabilité en étudiant des systèmes qu'on appelle des oscillateurs.

III Oscillateurs électroniques

P. Olive p203. **Définition :** un oscillateur électronique est un circuit alimenté (actif), bouclé, dans lequel des instabilités donnent naissance à un signal périodique. Intérêts :

- généré des signaux T-périodiques de tous types qu'on peut émettre avec des antennes ou générer des ultrasons avec un transducteur adapté,
- mesurer le temps (montre = résonnateur à quartz, chronomètre, etc.),
- molécule sur une surface vibrante va modifier légèrement sa fréquence de vibration : détecteurs de molécules à des très faibles concentrations,

Il en existe deux types : les quasi-sinusoïdaux et les oscillateurs à relaxation. On va se concentrer d'abord sur les oscillateurs quasi-sinusoïdaux en prenant l'exemple de l'oscillateur à Pont de Wien.

III.1 Oscillateur à Pont de Wien

Voir Dunod p1130-1134 ou Pacal Olive p.204 Prendre $R_1 \sim 1k\Omega$ pour l'amplification et $R = 1k\Omega$ dans le filtre. Déterminer :

- la valeur minimale de R1 ou R2 tel qu'il y a démarrage des oscillations,
- Déterminer la fréquence des oscillations (mesure de N périodes au point de croisement de l'annulation de la tension)

On peut aussi mesurer le temps des oscillations pour remonter à R_2/R_1 : mettre $t - t_0$ pour le fit et enregistrer le régime transitoire des oscillations par clé USB directement sur l'oscillo (faire un single). Fitter par

$$A \exp(-a\omega_0(t + t_0)) \times \sin(\sqrt{1 - \alpha^2}\omega_0(t + t_0)) \quad (11.5)$$

Conclusion

Ouverture : oscillateur à relaxation : comparateur à hystérésis horloge atomique dont la précision est de l'ordre de 1s sur l'âge de l'univers.

Leçon 12

Traitement d'un signal. Etude spectrale.

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Electronique	Pérez	Dunod	
Traitement des signaux et acquisition de données	Francis Cottet	Dunod	2-10-006312-X
Tout-en-un PSI		Tec&Doc	
Dictionnaire de physique	R. Taillet, L. Villain, P. Febvre	de Boeck	
Cours Jérémie Neveu	J. Neveu		

Commentaires des années précédentes :

- **2017** : Ce n'est pas une leçon sur le filtrage qui est attendue ; il ne faut pas se réduire à l'étude d'un ou plusieurs filtres électroniques,
- **2016** : Cette leçon ne peut en aucun cas se réduire à la simple étude de la théorie de Fourier,
- **2015** : Cette leçon ne doit pas se réduire à un catalogue de systèmes de traitement analogique du signal. Elle peut aussi mettre en exergue des méthodes numériques enseignées notamment dans les programmes de CPGE,

Plan détaillé

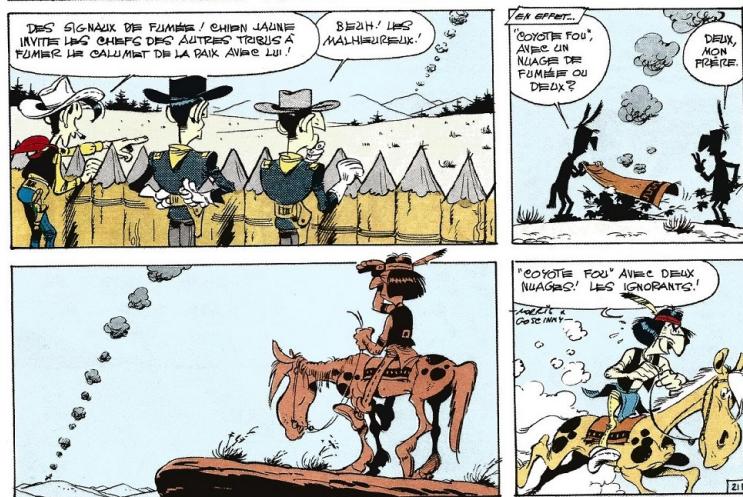
Niveau choisi pour la leçon : CPGE deuxième année

Prérequis :

- Electrocinétique : impédance, association série/parallèle, pont diviseur de tension

Introduction

Accroche : (cf cours Jérémy Neveu) L'enjeu des communications est de pouvoir envoyer un signal (*i.e.* une information) depuis un émetteur jusqu'à un récepteur afin que celui-ci puisse être d'une part reçu et d'autre part compris.



signal : (ref Taillet p674) Variation temporelle ou spatiale d'une quantité physique mesurable (tension, force, lumière, ...) portant une information.

Traitement du signal : Transformation d'un signal reçu par un récepteur pour en retirer l'information transmise initialement par un émetteur. Ex : si un observateur cherche à analyser les nuages émis par le feu (**signal**), il doit se séparer de celle émise par l'environnement (**bruit**) par différents moyen (se couvrir les yeux pour se protéger du soleil). « Se couvrir les yeux » = filtrage.

I Spectre et filtrage d'un signal

I.1 Décomposition Fourier

Cf Cottet Chap 2 - Tout signal peut se décomposer comme une série de signaux sinusoïdaux.

Cf Cottet p14- Spectre d'énergie (important pour la suite car modulation DBPC problématique) d'un signal cf Cottet. Composante continue, fondamental, harmoniques.

Propriétés TF (?) et principe de la FFT sur un oscillo (pour préparer les mesures de la deuxième partie)

I.2 Types de signaux

Signaux analogiques vs numériques, déterministes vs aléatoires. On va se concentrer sur les signaux analogiques et déterministes.

I.3 Réponse d'un filtre à une excitation périodique : exemple du filtre RC passe-bas

Prendre l'exemple d'un circuit RC passe-bas (mesure sur la capa). **Manip quantitative** : tracer le diagramme de Bode et déterminer la fréquence de coupure $f_c = \frac{1}{RC}$. Mettre en évidence le $-20 \log(\omega)$. Déterminer la bande passante.

I.4 Autres types de filtre

Transition : Maintenant qu'on a décrit un signal et qu'on sait en retirer des informations, on va voir comment en envoyer un et comment le réceptionner.

II Modulation et démodulation en amplitude

Fil conducteur : radio analogique. Cf cours de Jérémie. Deux problèmes :

- **l'encombrement** : par exemple deux personnes qui parlent en même temps,

- dimension des antennes : longueur de l'antenne doit être de l'ordre de la longueur d'onde soit 1500km pour $f = 20Hz$ et 1.5km pour $f = 20000Hz$
- ...

II.1 Principe de la modulation en amplitude

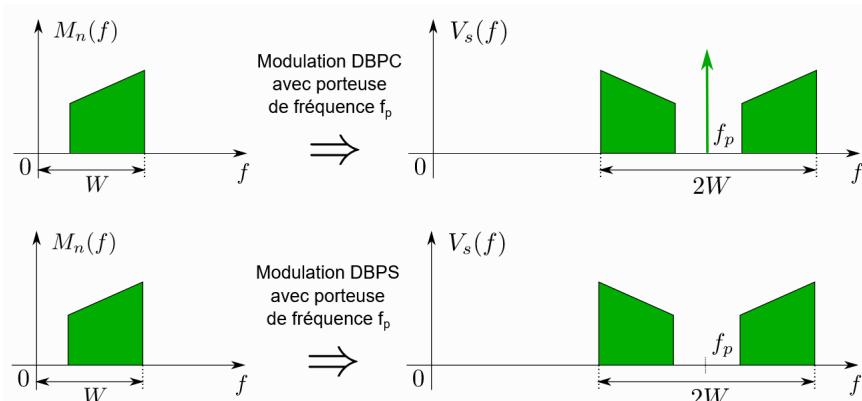
On souhaite passer à des tailles d'antennes raisonnable de l'ordre du mètre : soit $f = \frac{c}{\lambda} = 30MHz$: c'est le principe de la modulation.

Modulation : Accrocher un signal à transmettre à une porteuse : modulation de la porteuse. Ex : pigeon voyageur (porteuse) pour faire passer une lettre (signal modulant) d'un point A à un point B

Pour un signal EM :

- $V_m(t) = A + B \cos(\omega_m t)$ pour la modulation (GBF Agilent à $\frac{\omega_m}{2\pi} = 500 Hz$: le message à faire passer)
- $V_p(t) = V_0 \cos(\omega_p t)$ (BGX Métrix à $\frac{\omega_p}{2\pi} = 50 kHz$: le pigeon voyageur)

Faire le calcul à la sortie d'un multiplicateur. Deux cas particuliers : montrer modulation DBPC ($A \neq 0$) et DBPS ($A = 0$).



II.2 Démodulation par détection synchrone

Intérêt de la **Attention** : pour que ça puisse fonctionner, il faut que la porteuse puisse être regénérée (on peut le faire avec une boucle à vérouillage de phase cf cours Jérémie, le mentionner peut-être en conclusion de la partie).

Manip qualitative : démodulation par détection synchrone. Le TP est bien fait, montrer le signal qu'on module, le signal après multiplication par la porteuse et le signal après le filtre passe-bas.

Transition : L'algorithme de FFT qu'on a largement utilisé au cours des expériences repose sur la transformée de Fourier d'un signal échantillonné (discrétilisé). On va voir justement quelques avantages/inconvénients des traitements des signaux numériques.

III Quelques aspects du traitement des signaux numérique

III.1 Echantillonnage

Voir cours de Jérémy, parler du critère de Shannon.

III.2 Effet du fenêtrage temporel

p190 Cottet.

Conclusion et ouverture

Parler de la modulation en fréquence, en phase, leurs avantages. Ouvrir sur les signaux numériques. A

Leçon 13

Ondes progressives, ondes stationnaires.

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Tout-en-un PC/PC*	M.-N. Sanz	Dunod (2022)	
http://www. etienne-thibierge. fr/agreg/ondes_poly_ 2015.pdf	Ethienne Thibierge	2015	
http://images.math. cnrs.fr/Spectre.html# nh7	San Vu Ngoc	CNRS	
Ondes H-prépa	J-M Brébec	Hachette (2004)	
https://dropsu. sorbonne-universite. fr/s/nyD9Ppz3kH6BHZE	Clément Sayrin		

Commentaires des années précédentes :

- **2015** : Les candidats doivent être attentifs à bien équilibrer leur exposé entre ces deux familles d'ondes qui, d'ailleurs, ne s'excluent pas entre elles,
- **2014** : À l'occasion de cette leçon, le jury tient à rappeler une évidence : avec un tel titre, la leçon doit être équilibrée et ne peut en aucun cas se limiter pour l'essentiel aux ondes progressives.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE 2ème année

Prérequis :

— Forces, énergie

—

—

Introduction

Slide Quel est le point commun entre tous ces phénomènes : Olà dans un stade, effet d'une goutte qui tombe dans une flaue, un séisme, une corde soumise à des vibrations ? L'objectif de cette leçon est de donner les similitudes entre ces phénomènes et de pouvoir en retirer des caractéristiques générales.

I Approches du phénomène de propagation

I.1 Elongation d'une corde sans raideur

Voir Hprépa p30. **Hypothèses** : On regarde des petites perturbations de la hauteur de la corde notée $y(x, t)$. Obtenir l'équation de d'Alembert unidimensionnelle.

Donner les équations couplant $y(x, t)$ et $T(x, t)$ (p32) en disant que le phénomène de propagation est contenue dans ces équations liant vitesse transverse $\frac{\partial y}{\partial t}$ et la projection de la tension suivant $\hat{\mathbf{u}}_y$.

Transition : Ce couplage entre deux grandeurs rappelle celui de la tension et du courant. On peut effectivement faire l'analogie de la propagation de U et i dans un câble coaxial avec la tension et la déformation de la corde.

I.2 Analogie électrocinétique : le câble coaxial

Voir HPrépa p58. Prendre câble coaxial, montrer l'âme et la gain et le diélectrique. Faire le schéma d'un câble coaxial avec âme et gaine et le schéma électrique équivalent.

Hypothèses : On ne se place plus dans l'ARQS pour le câble tout entier car on

veut voir des phénomènes de propagation mais on peut le découper en tronçons dans lesquels la propagation est négligeable.

Obtenir les équations couplées (loi des mailles et loi des nœuds) et obtenir l'équation de d'Alembert unidimensionnelle.

Manip quantitative : mesure de la vitesse de propagation de i ou u dans le câble coaxial avec un câble de 100m de long. Envoyer un pulse d'impulsion 100ns, montrer le décalage sur la voie Y et mesurer ce décalage avec les curseurs. On obtient $v = \frac{2c}{3}$. On peut en déduire $n = \frac{v}{c} = \sqrt{\epsilon_r}$.

Définir la notion d'onde (poly Thibierge p10) : « Une onde correspond à la propagation d'une perturbation à travers un milieu. Cette perturbation est générée par une source, qui apporte de l'énergie au milieu. L'existence de deux grandeurs couplées qui se créent l'une l'autre est à la base du phénomène de propagation.

Dans le cas de la corde, une personne a mis en mouvement la corde. Dans le cas de la ligne, un expérimentateur a décidé de mettre un GBF. Dans le cas de la olà, un groupe de personne déclanche ce phénomène. Dans le cas de la goutte d'eau, un robinet qui fuit a amené de l'eau au milieu.

Slide : tableau analogie

On a décrit le phénomène de propagation comme l'existence de deux grandeurs couplées qui se propagent dans un milieu. On va maintenant voir la forme des solutions de l'équation de d'Alembert.

II Ondes progressives

II.1 Solution de l'équation de d'Alembert unidimensionnelle

A voir si on a le temps de la démontrer.

II.2 Interprétation

Voir Tec&Doc p128 ou Dunod p806-807 et Thibierge Exos C1. Faire les dessins avec correspondance temporelle et spatiale.

II.3 OPPH

Idée : tout signal périodique peut se décomposer en série de Fourier dont chaque terme est solution de l'équation de d'Alembert. Cela est possible par la linéarité de l'équation.

Obtenir la relation de dispersion. Définir vitesse de phase et vitesse de groupe.

III Onde stationnaire

On peut imaginer une onde progressive et une onde régressive qui se propagent et qui se rencontrent.

III.1 Corde de Melde

IV Conclusion

Conclure sur absorption, dispersion, impédance. Prendre exemple Dunod p818 en introduisant une force de frottement.

Leçon 14

Ondes acoustiques.

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Tout-en-un PC/PC*	M.-N. Sanz	Dunod (2022)	
http://www. etienne-thibierge. fr/agreg/ondes_ poly_2015.pdf	Ethienne Thibierge	2015	
Ondes H-prépa	J-M Brébec	Hachette (2004)	
https://dropsu. sorbonne-universite. fr/s/ nyD9Ppz3kH6BHZE	Clément Sayrin		
Ondes acoustiques	A. Chaigne	Ecole Polytechnique (2011)	
Optique Physique et électronique	D. Mauras	PUF (2001)	

Commentaires des années précédentes :

- **2017** : La contextualisation et des applications de la vie courante ne doivent pas être oubliées dans cette leçon qui se résume souvent à une suite de calculs. De plus, les fluides ne sont pas les seuls milieux dans lesquels les ondes acoustiques peuvent être étudiées,
- **2014** : Cette leçon peut être l'occasion de traiter les ondes acoustiques dans les fluides ou dans les milieux périodiques, certes, mais elle peut aussi être l'occasion de traiter les deux cas qui donnent lieu à des phénoménologies très différentes,

- 2013 : Le candidat est libre d'étudier les ondes acoustiques dans un fluide ou dans un solide élastique.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon :

Prérequis :

- équations de la mécanique des fluides
- coefficient de compressibilité isentropique
-

Introduction

Nous allons décrire dans cette leçon la propagation des ondes acoustiques. Deux points sont importants dans cette description :

- La propagation nécessite un milieu matériel pour avoir lieu : expérience de la cloche sous vide (expérience de Otto von Guericke seconde moitié du XVIIème ou Robert Boyle plus performant) <https://www.youtube.com/watch?v=BC9Pod4cnpk>,
- La propagation est issue d'un couplage entre les variations de pression du fluide et les variations de vitesse des particules.

I Description des ondes acoustiques

Les équations de la mécanique des fluides sont des équations non linéaires et donc difficile voir impossible à résoudre. Pour décrire la propagation des ondes dans les fluides, on va devoir faire quelques hypothèses qu'on pourra justifier a posteriori.

I.1 Approximation acoustique

On va considérer un fluide parfait (i.e. sans prendre en compte les effets de visco-sité, déformations réversibles du milieu) qui est caractérisé par :

- Une pression au repos P_0 ,
- une masse volumique uniforme ρ_0 ,
- une vitesse moyenne particulaire nulle

Une onde sonore est une perturbation par rapport à cet état d'équilibre. L'état du fluide est donc décrit par :

- la pression $P(M, t) = P_0 + P_1(M, t)$ où P_1 est appelé **pression acoustique ou surpression**,
- la masse volumique (compression/dilatation du fluide) $\rho(M, t) = \rho_0 + \rho_1(M, t)$,
- la vitesse particulaire $\mathbf{v}(M, t) = \mathbf{0} + \mathbf{v}_1(M, t)$.

approximation acoustique : on se place dans le cadre de faibles perturbations $|P_1(M, t)| \ll P_0$, $|\rho_1(M, t)| \ll \rho_0$ et $|\mathbf{v}_1(M, t)| \ll V_0$ avec V_0 une vitesse qu'on déterminera, et on négligera les termes d'ordre 2.

Transition : Maintenant qu'on a placé le cadre de notre étude, on va pouvoir étudier la propagation. Et pour cela on va utiliser les équations de la mécanique des fluides.

I.2 Equation de propagation du son

Voir Mauras p5.

On a à notre disposition deux équations en mécanique des fluides, l'équation locale de la conservation de la masse et l'équation d'Euler (fluide parfait) en négligeant la gravité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v})(M, t) = 0 \quad (14.1)$$

$$\rho(M, t) \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}(M, t) + (\mathbf{v} \cdot \operatorname{grad}) \mathbf{v}(M, t) \right) = -\operatorname{grad} P(M, t) \quad (14.2)$$

On va linéariser ces équations en ne gardant que les termes à l'ordre 1. Pour l'équations de conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \rho_0 \operatorname{div}(\mathbf{v}_1)(M, t) = 0 \quad (14.3)$$

où on fait apparaître une relation entre ρ_1 et v_1 alors qu'on préfèreraient entre v_1 et P_1 . Problème, on a 4 équations pour 5 inconnues. Il en faut donc une cinquième. On va supposer que le comportement du fluide est décrit par une équation du type $\rho = f(P)$. Si on suppose que la passage de l'onde se fait suffisamment rapidement pour la transformation du milieu soit adiabatique (p872

Dunod + réversible comme écoulement parfait), on peut utiliser la définition du coefficient de compressibilité isentropique χ_S :

$$\chi_S = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_S = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_S \quad (14.4)$$

et un développement de Taylor permet d'obtenir $\rho_1 = \chi_S \rho_0 P_1$ ce qui donne pour l'équation locale de la conservation de la masse :

$$\chi_S \frac{\partial P_1}{\partial t} + \operatorname{div}(\mathbf{v}_1)(M, t) = 0 \quad (14.5)$$

L'hypothèse \mathbf{v}_1 petite consiste à négliger le terme $\mathbf{v} \cdot \operatorname{grad} \mathbf{v}(M, t)$ devant $\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}$ ce qui est possible si $v \ll c = V_0$ qui est la vitesse introduite au début de cette partie. On trouve en linéarisant l'équation d'Euler :

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}_1}{\partial t}(M, t) = -\operatorname{grad} P_1(M, t) \quad (14.6)$$

En utilisant le théorème de Schwarz, on trouve les équations de propagation de la suppression et de la vitesse :

$$\frac{\partial^2 P_1}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \Delta P_1 \quad (14.7)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{v}_1}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \Delta \mathbf{v}_1 \quad (14.8)$$

avec $c = \frac{1}{\sqrt{\chi_S \rho_0}}$ la vitesse du son dans l'air.

Comme on a une transformation isentropique, on peut utiliser la loi de Laplace :

$$PV^\gamma = \text{cste}$$

$$dPV^\gamma + \gamma PV^{\gamma-1} dV = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial P} = -\frac{V}{\gamma P}$$

$$\chi_S = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right) = \frac{1}{\gamma P} = \frac{M}{\gamma \rho RT}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\chi_S \rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M_{air}}}$$

I.3 Mesure de la vitesse des ondes ultrasonores

Expérience quantitative : On prend deux piézo-électriques sur un banc optique. Un est relié à un GBF, l'autre à l'oscillo. On mesure un décalage de plusieurs longueurs d'ondes (10λ) et on prend les positions relatives des capteurs. On détermine $c = \lambda f$. On mesure ici la vitesse de phase. Pour mesurer la vitesse de groupe, utiliser la fonction Burst du GBF, mesurer le temps de vol pour plusieurs positions.

D. Mauras p6, application : séparation isotopiques de l'uranium par diffusion gazeuse à partir d'hexafluorure d'uranium gazeux.

II Aspect énergétique

Leçon 15

Propagation guidée des ondes.

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Electromagnétisme	Pérez	Dunod	
http://www. etienne-thibierge. fr/agreg/ondes_poly_ 2015.pdf	Etienne Thibierge		

Commentaires des années précédentes :

- **2014** : Les candidats doivent avoir réfléchi à la notion de vitesse de groupe et à son cadre d'utilisation,
- **2013** : Les notions de modes et de fréquence de coupure doivent être exposées. On peut envisager d'autres ondes que les ondes électromagnétiques,
- **2010** : La propagation guidée ne concerne pas les seules ondes électromagnétiques ou optiques. Il faut insister sur les conditions aux limites introduites par le dispositif de guidage.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon :

Prérequis :

- propagation des ondes EM dans le vide, équations de Maxwell,
- optique ondulatoire (conditions d'interférences)
- optique géométrique : théorème de Malus, principe du retour inverse de la lumière

Déroulé détaillé de la leçon :

Introduction

Pour transmettre une onde sphérique (sonore ou électromagnétique) à partir d'une source, on voit qu'il y a un problème car l'amplitude de l'onde varie en $1/r$ et la densité locale d'énergie de l'onde varie en $1/r^2$ par conservation de l'énergie. Si on veut transmettre une information, il faut donc soit une très grande puissance à l'entrée (dangereux et pas spécialement possible techniquement), soit être plus malin et guider l'onde jusqu'au récepteur. On va cependant voir qu'il existe quelques contraintes. [Expérience qualitative : deux émetteurs piézo avec ou sans tube.](#)

I Phénoménologie du guidage

Ne pas passer trop de temps sur cette partie ($\sim 10\text{min}$). Faire le dessin. On prend l'approche phénoménologique du guidage d'ondes lumineuses dans la fibre optique.

I.1 Modèle de la fibre optique

Faire le schéma de la fibre optique tel que dans le poly de Thibierge. On regarde la propagation d'une onde plane monochromatique de longueur d'onde dans le vide λ

Condition de guidage : interférences constructives entre deux réflexions successives *i.e.* que leur déphasage soit un multiple de 2π .

I.2 Caractéristiques du guidage

Après construction de S_0 , S_1 et S_2 , on obtient le déphasage entre l'onde issue de S_0 et celle issue de S_2 :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{n_2\lambda} n_2 S_2 B - \frac{2\pi}{n_1\lambda} n_1 S_0 B = \frac{2\pi}{\lambda} S_2 H \quad (15.1)$$

d'après le principe de retour inverse + théorème de Malus. Comme $\sin\theta = \frac{S_2 H}{2a}$:

$$\sin(\theta_p) = \frac{p\lambda}{2a} \quad (15.2)$$

Les angles d'incidence qui permettent la propagation dans la fibre prennent des valeurs discrètes ! **p désigne un mode de propagation dans la fibre.**

Tous les modes ne peuvent pas se propager :

$$\sin(\theta_p) \leq 1 \Rightarrow \omega \geq p \frac{\pi c}{a} = \omega_{c,p} \quad (15.3)$$

Une pulsation de coupure basse fréquence est associée à chaque mode en dessous de laquelle il n'y a pas guidage. On peut donc guider uniquement des ondes dont les longueurs d'ondes sont inférieures à $2a \sim 10^{-3}m$: optique, infrarouge.

Application numérique : pour $\lambda = 500nm$ et $a = 1mm$, on peut avoir $p = 4000$ modes de propagation dans la fibre.

Voir Houard p66. Parler de dispersion intermodale et intramodale ? En parler après si on a le temps.

Pour les ondes de plus basses fréquences, on est obligé d'utiliser d'autres systèmes : fil conducteur pour les ondes BF ($< 1MHz$), câbles coaxiaux pour les ondes HF ($< 1GHz$). Pour les ondes centimétriques, on a besoin de guide d'ondes creux dont on va maintenant détailler la physique plus quantitativement que pour les ondes lumineuses.

II Propagation d'une onde centimétrique dans un guide

Dans les câbles coaxiaux, il y a une importante atténuation des signaux pour les fréquences supérieures à 1 GHz. On utilise pour ces fréquences d'autres supports.

On va s'intéresser dans cette partie à la possibilité qu'une onde électromagnétique puisse se propager dans un guide plan.

II.1 Modélisation idéalisée du guide plan

Faire le schéma. Voici les hypothèses :

- L'étude de la propagation des ondes dans les milieux conducteurs montre qu'il existe une onde evanescente qui transporte de l'énergie hors du guide. Ici on va supposer les **conducteurs parfaits** pour supprimer les pertes et simplifier les calculs,
- Le milieu entre les plaques est de l'air qu'on va idéaliser à du vide pour enlever les effets de dispersion qui n'est pas propre au guidage.

L'équation de propagation est celle des ondes dans le vide c'est-à-dire une équation de d'Alembert :

$$\Delta \mathbf{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (15.4)$$

$$\Delta \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (15.5)$$

En revanche, du fait de la présence du guide, les champs **E** et **B** doivent satisfaire les conditions aux limites à savoir la continuité de la composante tangentielle de **E** et la composante normale de **B** qui s'annulent aux deux faces :

$$E_z(x=0) = E_z(x=a) = 0 \quad E_y(x=0) = E_y(x=a) \quad (15.6)$$

$$B_x(x=0) = 0 \quad B_x(x=a) = 0 \quad (15.7)$$

On va chercher des solutions qui se propagent dans la direction z du guide. Comme il y a également invariance par translation suivant $\hat{\mathbf{u}_z}$, on peut écrire les ondes comme :

$$\mathbf{E} = \mathbf{E_m}(x) e^{i(\omega t - k_z z)} \quad (15.8)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B_m}(x) e^{i(\omega t - k_z z)} \quad (15.9)$$

Remarquons qu'ici on n'a pas la structure d'onde plane car il y a une dépendance de l'amplitude de l'onde EM en x. On définit alors :

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{k_z} \quad (15.10)$$

la longueur d'onde de l'onde guidée.

On va également définir :

- les ondes transverses électriques TE qui sont reliées aux composantes E_z et E_y de l'onde dans le guide,
- les ondes transverses magnétiques reliées aux composantes B_y et B_z de l'onde dans le guide

Ce sont les équations de Maxwell-Faraday et Maxwell-Ampère qui nous permettent de définir ces deux groupes d'ondes transverses. La linéarité des équations permettent d'étudier séparément ces deux groupes et d'obtenir l'ensemble des solutions par combinaison linéaire.

On va regarder uniquement les ondes TE.

II.2 Relation de dispersion des ondes TE dans le guide

On cherche les solutions \mathbf{E} sous la forme :

$$\mathbf{E} = (E_x(x)\hat{\mathbf{e}}_x + E_y(x)\hat{\mathbf{e}}_y)e^{i(\omega t - k_z z)} \quad (15.11)$$

Comme $\text{grad} \cdot \mathbf{E} = \frac{\partial E_z}{\partial z} = ik_z E_z = 0$ donc $E_z = 0$. En injectant cette solution dans l'équation de d'Alembert :

$$\frac{d^2 E_y}{dx^2} + \frac{d^2 E_y}{dz^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \quad (15.12)$$

$$\frac{d^2 E_y(x)}{dx^2} + (k^2 - k_z^2) E_y(x) = 0 \quad (15.13)$$

avec les conditions $E_y(0) = E_y(a) = 0$. Il y a trois cas de figure :

1. Si $k^2 - k_z^2 < 0$, on peut montrer qu'il n'y a pas de solutions qui se propagent avec les CL,
2. Si $k^2 - k_z^2 = 0$, on a une solution affine qui est nulle avec les CL,
3. Si $k^2 - k_z^2 = k_x^2 > 0$, on a la possibilité d'une solution qui se propage dans le guide.

La solution s'écrit :

$$E_y = A e^{ik_x x} + B e^{-ik_x x} \quad (15.14)$$

Les CL donnent :

$$E_y(x = 0) = 0 \Rightarrow A = -B \quad (15.15)$$

$$E_y(x = a) = 0 \Rightarrow k_x = p \frac{\pi}{a} \quad (15.16)$$

On a alors des modes de propagation des ondes TE comme pour la fibre. On notera ces mode TE_p . On a une relation de dispersion non linéaire entre $k_z = \frac{2\pi}{\lambda_g}$ et $\omega = 2\pi\frac{c}{\lambda_0}$ qu'on peut écrire comme :

$$\lambda_g^2 = \frac{\lambda_0^2}{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2} \quad (15.17)$$

On a ici introduit une **fréquence de coupure** $\lambda_c = \frac{2a}{p}$. Si on envoie une onde de longueur d'onde λ , elle peut se propager dans des modes TE_p si $\lambda_p \geq \lambda_c$. Le guide se comporte comme un filtre passe-haut.

Si il n'y a que le mode TE_1 qui peut se propager, le guide est monomode. Si l'onde peu se propager dans plusieurs modes TE, le guide est dit multimode.

Remarque : le milieu est dispersif non par rapport à sa nature (on a supposé que c'était du vide) mais par rapport à la géométrie du guide.

Transition : je vous propose de vérifier cette relation dans le cadre du guide d'onde rectangulaire.

II.3 Relation de dispersion du mode TE_1 dans le guide rectangulaire

Sur slide : Pour être rigoureux, on peut montrer qu'il y a des modes $TE_{p,q}$ qui peuvent se propager dans le guide du fait de deux interfaces. La relation de dispersion du guide rectangulaire de côté a et b pour ces modes est :

$$k^2 = k_z^2 + p^2 \frac{\pi^2}{a^2} + q^2 \frac{\pi^2}{b^2} \quad (15.18)$$

Ce guide est monomode pour des pulsations ($a = 22.860 \pm 0.046$ mm et $b = 10$ mm) :

$$\left(\frac{\pi^2}{a^2}\right) \leq \frac{\omega^2}{c^2} \leq \left(\frac{\pi^2}{a^2}\right) + \left(\frac{\pi^2}{b^2}\right) \quad (15.19)$$

$$6.56 \text{ GHz} \leq f \leq 16.4 \text{ GHz} \quad (15.20)$$

Comme on dispose d'une diode Gunn pouvant produire des ondes allant de 8.2 GHz à 10 GHz, on ne peut propager que le mode TE_{10} dont la relation de

dispersion est donnée par l'équation (15.17).

Expérience quantitative : Vérification de la relation de dispersion dans un guide et mesure de la fréquence de propagation dans un guide d'onde (TP Onde 2).

II.4 Vitesse de phase et vitesse de groupe

Pour $p = 1$:

$$v_\phi = \frac{\omega}{k_z} = \frac{c}{1 - \frac{\lambda_0^2}{\lambda_c^2}} \quad (15.21)$$

$$(15.22)$$

Transition : On a vu la relation de dispersion des ondes dans le guide, on va voir plus en détail l'aspect expérimental du guide d'onde.

III Aspect expérimental du guide d'onde

Si on a le temps : parler des pertes, du ROS, de l'abbaque de Smith.

Conclusion

Leçon 16

Microscopies optiques

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Les instruments d'optique	Luc Detwiller	Ellipses (1997)	
http://ressources.agreg.phys.ens.fr/media/ressources/RessourceFichiers/11-Maxime_Dahan_-_Microscopie_pour_la_biologie.pdf	M. Dahan	Vraiment bien	
https://www.nikonsmallworld.com/	Nikon		
Les nouvelles microscopies	L. Aigouy	Belin	
Optique	Sylvain Houard	de Boeck	
Optique	Eugène Hecht	Pearson	
OPTIQUE Physique	R. Taillet	de Boeck (2006)	

Commentaires des années précédentes :

- **2017** : L'intérêt des notions introduites doit être souligné,
- **2016** : Une technique récente de microscopie optique à haute résolution doit être présentée,
- **2010** : La propagation guidée ne concerne pas les seules ondes électromagnétiques ou optiques. Il faut insister sur les conditions aux limites introduites par le dispositif de guidage.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon :

Prérequis :

- Optique géométrique : lentilles, construction images par une lentille
- Diffraction par un cercle
-

Déroulé détaillé de la leçon :

Introduction

L'homme a voulu voler, voir loin dans l'Univers mais aussi voir l'infiniment petit. On appelle microscopie l'ensemble des techniques permettant de rendre discernables et visuels des objets indiscernables à l'œil nu (environ 1 minute d'arc = 0.017° pour une vision 10/10 soit environ 100km de la surface de la Lune).

I Le principe du microscope

I.1 Présentation du dispositif

Faire le schéma du microscope.

L'objectif : lentille convergente de courte focale qui fait une image intermédiaire A_1B_1 de l'objet AB à agrandir. **L'oculaire** : lentille convergente faisant une image à l'infini de A_1B_1 pour que l'œil qui s'y accole n'accorde pas. On doit donc avoir $O_2A_1 = -f'_2$.

I.2 Grossissement commercial

Grossissement oculaire : $G_{c,oc}$, rapport entre l'angle sous lequel est vu l'objet (A_1B_1) à travers l'oculaire et l'angle sous lequel est vu le même objet à travers $G_{c,oc} = \frac{\alpha'}{\alpha_1} = \frac{A_1B_1/f'_2}{A_1B_1/PP} = \frac{PP}{f'_2}$.

Grandissement objectif : $\gamma_{obj} = \frac{A_1B_1}{AB} = -\frac{\Delta}{f'_1}$ par le théorème de Thalès+formule de conjugaison de Descartes.

Grandissement commercial : $G_c = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{A_1B_1/f'_2}{AB/PP} = |\gamma_{obj}|G_{c,oc} = \frac{PP\Delta}{f'_1 f'_2}$

Le grossissement commercial d'un microscope est donné par :

$$G_{com} = |\gamma_{ob}| G_{oc} = \frac{\alpha'}{\alpha} \quad (16.1)$$

Expérience quantitative : Faire l'image d'une mire micrométrique par un microscope optique. Pour cela :

- utiliser une lampe quartz-iode/LED,
- 1 condenseur de 8 ou 12 cm pour focaliser 1 lumière sur la mire
- un microscope avec une mire micrométrique (pas 0.1mm),
- une lentille de focale 1m ou 150cm,
- fixer l'écran à la distance focale de la lentille,
- ajuster le microscope pour avoir une image nette sur l'écran

On mesure $\alpha' = \frac{\text{Taille-objet-sur-l'écran}}{\text{distance-objet-écran}}$ ainsi que les incertitudes associées.



On doit faire des traits bien droits pour la mesure de la distance à l'écran. Pour cela, prendre une feuille et la coller à l'écran, reproduire les traits sur la feuille. Faire la mesure à la règle proprement sur la feuille en traçant des angles droits.

En préparation, j'ai trouvé $G_{com} = 40.5(3)$ à comparer à 40. Bon ordre de grandeur, la valeur peut-être différente de 40, le microscope ne coûte pas cher et pas d'incertitudes sur la valeur du constructeur.

Slide : Montrer le nouveau microscope par rapport à celui de 1930 sur slide.

I.3 Eclairage de Köhler

Voir Wastiaux p130. En parler rapidement sur slide, montrer qu'on fait l'image du filament de la source à l'infini pour ne pas être gêné par celui-ci. Parler du diaphragme de champ et d'ouverture.

Transition : Est-ce que si je prends des focales f' ou infiniment petites, je peux observer des choses infiniment petites ? On va voir que non car il y a des limitations.

II Limitations (trouver mieux pour le nom)

II.1 Résolution latérale : critère de Rayleigh

p136 Aigouy et Taillet p.227. Présenter l'ouverture numérique. Plus on augmente en Δk plus on est résolu en Δx . Faire des applications numériques voir Detwiller p110. Parler des objectifs à immersion en faisant un dessin.

II.2 Profondeur de champ

Faire le dessin avec trois points sources. Il faut diaphragmer pour améliorer la profondeur de champ.

II.3 Aberrations (partie qui peut sauter)

Sur slide ? Parler des lentilles achromatiques, apochromatique.

Transition : Comment rendre visible des choses que ne le sont pas ?

III Microscopie à contraste de phase

Voir TD Diffraction (2) Clément Sayrin.

Cette technique s'intéresse en particulier à des échantillons transparents dont les épaisseurs sont faibles **Slide photos avec ou sans contraste de phase + photos microscopies Nikon**. Elle a valu le prix Nobel à Frederik Zernike en 1953.

III.1 Principe

Voir Hecht p635. On envoie de la lumière sur un objet dit de phase qui va modifier localement la phase de la lumière incidente :

$$E_i = E_0 e^{i\phi} = E_0 + E_0 \times (e^{i\phi} - 1) \sim \quad (16.2)$$

On fait passer la lumière à travers une lentille qui va donner la figure de diffraction dans fait l'image de cette

Ouverture

Microscopie électronique par effet tunnel

Leçon 17

Interférences à deux ondes en optique

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Physique Spé MP-MP*	Olivier, Gié, Sarmant	Tec & Doc	
Sextant		Hermann	
Tout-en-un, MP	M.-N. Sanz.	Dunod	
Optique	S. Houard	de Boeck	
Optique Physique	R. Taillet	de Boeck (2006)	

Commentaires des années précédentes :

- **2016** : Les approximations mises en oeuvre dans les calculs de différence de marche doivent être justifiées a priori,
- **2015** : L'exposé doit permettre de préciser clairement les contraintes particulières que l'optique impose aux dispositifs interférentiels par rapport à d'autres domaines,
- **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.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE

Prérequis : Modèle scalaire d'une onde, chemin optique, différence de marche, intensité lumineuse, formules trigonométriques

Déroulé détaillé de la leçon :

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.

I Interférences à deux ondes

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

I.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 : $I(M, t) = < a^2(M, t) >$.

En développant, on obtient :

$$I = I_1 + I_2 + I_{1,2} \quad (17.1)$$

avec $I_{1,2} = 2A_1A_2 \cos(\omega_1 t - \phi_1(M)) \cos(\omega_2 t - \phi_2(M))$

I.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 :

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\phi(M) \quad (17.2)$$

où $\Delta\phi(M) = \frac{2\pi([S_2M] - [S_1M])}{\lambda_0}$

II Exemple d'interféromètre : les trous d'Young

$$I = 2I_0 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi ax}{\lambda D} \right) \right] \quad (17.3)$$

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

Manipulation quantitative : Mesure de l'interfrange de la figure d'interférences pour en déduire a . Pour cela on a besoin :

- barette CCD + logiciel MHTEX + filtre de densité
- double fentes d'Young dont la longueur entre les fentes est donnée
-
-
- . On mesure $a = 0.16 \pm 0.04\text{mm}$ à comparer avec la valeur $a_{fabricant} = 0.2\text{mm}$.

Transition : Pour l'instant, on est resté sur le fait qu'on avait deux sources cohérentes produisant des interférences non localisées. Que se passe-t'il si on élargi la source ?

III Effet de largeur de la source : cohérence spatiale

III.1 Présentation du problème

Voir Dunod p733 en **prenant bien un élargissement de la source dans une direction parallèle à S_1S_2** , sinon ça ne change rien à la différence de marche. Effet de la largeur de la source en reprenant le problème avec deux sources séparées par une distance b (voir Dunod 2022 p733). On somme leur intensité. On obtient à l'aide des formules obtenues dans la partie précédente :

$$I_{tot} = 4I_0 \left[1 + \cos \left(\frac{\pi ab}{\lambda D} \right) \cos \left(\frac{2\pi ax}{\lambda D} + \frac{2\pi ab}{\lambda D} \right) \right] \quad (17.4)$$

III.2 Cône de cohérence

Voir Dunod p738-739. Expérience de Grimaldi qui voulait voir des interférences par deux trous de la lumière du soleil.

IV Conclusion

Ouverture sur les dispositifs à division d'amplitude qui permettent de ne pas avoir de problème de cohérence spatiale mais dont le prix à payer est la localisation des franges d'interférences.

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

C : D'autres phénomènes d'interférences autres que lumineuses ? Oui, exemple de la cuve à onde. Qu'est-ce qui fait la spécificité des interférences des ondes lumineuses ? On peut faire des mesures super précises.

C : Conditions de cohérence pour l'eau ? On somme directement les amplitudes, il n'y a pas de notion de cohérence pour une onde mécanique.

C : Dépendance de la durée d'intégration ? Odg temps de réponse d'un détecteur ? Période de la lumière : 10^{-15} s, œil : 10^{-2} s, photorésistance 10^{-2} s, photodiode (standard) : 10^{-6} s, thermopile : 1s

C : lien entre intensité I et éclairement ϵ ? On a $\epsilon = KI = K < s^2(M, t) >$, où $< \dots >$ représente la valeur moyenne temporelle, K est une constante qui dépend du détecteur et $s(M, t)$ représente une composante du champ électrique de la lumière par rapport à un axe perpendiculaire à sa direction de propagation. L'éclairement est la puissance surfacique moyenne de l'onde lumineuse (autrement dit la valeur moyenne temporelle du vecteur de Poynting).

C : Pourquoi il faut un vide entre deux trains d'ondes ? Lié à la désexcitation de l'atome, la durée de vie d'un niveau d'énergie. Un train d'onde c'est un photon du coup ? C'est l'aspect ondulatoire du photon.

C : C'est quoi la cause de l'incohérence spatiale ? Emission de trains d'onde de phase à l'origine aléatoire suivant l'atome émetteur.

C : Différences/avantages interférométrie à division d'amplitude/division du front d'onde ? Division du front d'onde : on fait interférer de la lumière provenant de deux sources différentes. Les interférences ne sont pas localisées mais il y a un problème de brouillage du fait de la cohérence spatiale des sources. Division d'amplitude : on fait interférer de la lumière provenant

d'un même faisceau incident dont on a séparé en deux (au moins) l'amplitude. Il n'y a pas de problème lié à la cohérence spatiale de la source mais le prix à payer est la localisation des interférences (à l'infini pour une lame d'air, à distance finie pour un coin d'air). L'avantage est de pouvoir utiliser des sources de lumière très étendues, on gagne en luminosité.

C : Stratégies à mettre en œuvre pour éviter 20% d'erreur sur les mesures ? Caméra CCD, mettre une lentille pour agrandir l'image Ca change quoi avec une lentille ? On remplace D par f' dans la formule de I_{tot} . C'est mieux du coup ? On peut mesurer f' de façon assez précise Quoi d'autre ? Pied à coulisse, banc optique, ...

Leçon 18

Interférométrie à division d'amplitude

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Optique physique et électronique	Daniel Mauras	Presse Universitaire de France (2004)	
Optique Physique	Richard Taillet	de boeck (2015)	953-087864-7
Optique	Sylvain Houard	de boeck (2014)	
Optique et physique ondulatoire	Bertin Farroux Renault	Dunod (1986)	

Commentaires des années précédentes :

- **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

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Licence 3

Prérequis : Optique Géométrique, Interférences à deux ondes, Interférences à division du front d'onde, cohérence temporelle/cohérence spatiale

Déroulé détaillé de la leçon :

Introduction : interférences à division du front d'onde

Interférences sont beaucoup utilisées en physique et même dans la vie de tous les jours : exemple du casque anti-bruit qui fait interférer les ondes sonores de l'extérieur avec celles du son dans le casque audio.

Dans la suite, on s'intéresse aux interférences à deux ondes lumineuses.

Retour sur les fentes d'Young ([slide 1](#)). Avec un éclairement des fentes par une source ponctuelle, on observe des franges d'interférences non localisées sur un écran.

Problème : ([slide 2](#)) quand on augmente la taille de la source, on observe un brouillage de la figure d'interférences et donc une perte de contraste : problème de cohérence spatiale de la source.

On va voir que l'interférométrie à division d'amplitude permet de s'affranchir de ce problème. Annonce du plan :

- Division d'amplitude
- Un exemple d'interféromètre à division d'amplitude
- Une application pratique de la division d'amplitude

I Division d'amplitude

I.1 Théorème de localisation

Considérons un système interférométrique éclairé par une source monochromatique étendue tel que représenté sur la Figure 18.1. On souhaite qu'au point M, les intensités lumineuses provenant de S et S' qui s'ajoutent ne produisent pas de brouillage. Autrement dit, nous avons la condition de non-brouillage au point M suivante :

Condition de non-brouillage : $\Delta(M) = \delta(S', M) - \delta(S, M) = 0$

On montre (dans D. Mauras p. 159) que :

$$-n(\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_1) \cdot \mathbf{S}\mathbf{S}' = 0 \quad (18.1)$$

Cette équation nous permet de distinguer deux cas :

- $\mathbf{u}_2 \neq \mathbf{u}_1$: c'est une contrainte sur la source, les rayons qui interfèrent en M ne sont pas issus du même rayon incident. C'est le cas des interféromètres à **division du front d'onde**.
- $\mathbf{u}_2 = \mathbf{u}_1$: c'est une contrainte sur l'interféromètre. Les rayons qui interfèrent sont issus du même rayon incident. Le système optique doit contenir une lame séparatrice qui divise en deux un rayon incident puis fait interférer les deux rayons ainsi créés : c'est **la division d'amplitude**.

Théorème de localisation : (Slide 3) Seuls les dispositifs à division d'amplitude peuvent donner des interférences contrastées produites par des sources arbitrairement larges. Ces interférences sont alors **localisées** au voisinage des points d'intersection des couples de rayons lumineux issus du même rayon incident.

I.2 Lame d'air

Un exemple simple d'interféromètre à division d'amplitude est celui de la lame d'air. On peut montrer que la différence de marche entre deux rayons lumineux sortant de la lame d'air est donné par :

$$\delta(M) = 2ne \cos i \quad (18.2)$$

avec e l'épaisseur de la lame d'air et i l'angle d'incidence du rayon lumineux provenant de la source S. On peut faire quelques remarques :

- Les interférences sont localisées à l'infini, il faut donc une lentille convergente et un écran placé dans le plan focal image de cette dernière pour observer la figure d'interférences,
- Pour une même épaisseur e , l'intensité lumineuse ne dépend que de i : on observe des franges circulaires dites **d'égales inclinaison** qu'on comprend bien en analysant les hyperboloïdes d'interférences ([slide 4](#)),
- Pour une source étendue, les franges sont plus brillantes.

On va voir à présent un système interférométrique réalisant effectivement la lame d'air : il s'agit de l'interféromètre de Michelson.

II Interféromètre de Michelson

Rappel historique : Expérience de Michelson et Morley au 19^e qui démontre que la vitesse de la lumière est la même dans toutes les directions. Prix Nobel de Physique décerné à Albert Michelson en 1907.

II.1 Présentation du montage en configuration lame d'air

Le schéma de principe est présenté ([slide 5](#)). Schéma équivalent au tableau tel que représenté sur la Figure 18.2. Le Michelson n'est certes pas sensible à la cohérence spatiale de la source mais est sensible à sa cohérence temporelle : $\delta(M) \sim 2e < L_c = c\tau_c = c/\Delta\nu = \Delta\lambda/\lambda^2$. En odg :

- laser He-Ne à $\Delta\nu = 10MHz$, $L_c \sim 30m$
- lumière blanche, $L_c \sim 1\mu m$

Ainsi pour régler le Michelson, on commence par utiliser un laser qui est une source spatialement et temporellement cohérente. Si on souhaite changer de source temporellement moins cohérente que le laser, on se met au contact optique ($e = 0$) en utilisant la propriété suivante : on peut montrer que le rayon des anneaux est proportionnel à $1/\sqrt{e}$, ainsi si e diminue, les anneaux s'agrandissent et rentrent vers leur centre.

→ observation de la figure d'interférence d'un Michelson éclairé par lampe à vapeur de sodium. On voit les anneaux avec une lentille de $f' = 20cm$ (faible luminosité de la source et salle assez éclairée, utiliser un condenseur à la sortie de la source pour maximiser l'éclairage sur les miroirs) et on peut repérer le contact optique. On observe également un brouillage des franges pour certaines

positions du miroir (M1) car doublet du sodium.

On va mesurer l'écart en longueur d'onde de ce doublet.

II.2 Mesure interférométrique du doublet du sodium

On rappelle la formule de l'éclairage pour deux sources lumineuses de longueur d'onde différente ([slide 6](#)). L'écart Δe entre deux anticoïncidences est donné par :

$$\Delta e = \frac{\bar{\lambda}}{2\Delta\lambda^2} \quad (18.3)$$

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

→ S'éloigner du contact optique de ma nière à pouvoir visualiser 5 ou 6 anticoïncidences. Mesurer Δe , déterminer $\Delta\lambda$ avec son incertitude et comparer à la valeur tabulée $\Delta\lambda = 0,597\text{nm}$ ([Encyclopedia Britannica](#)).

Grâce au Michelson, on est capable de faire des mesures interférométriques très précises (inférieures au nm!).

Conclusion

Présentation de la tomographie en cohérence optique ([Slide 7](#)). Voir R. Taillet.
Ouverture sur le Fabry-Pérot avec la visualisation des anneaux du doublet du sodium obtenues par Fabry-Pérot (contraste des systèmes d'anneaux de λ_1 et λ_2) ([Slide 8](#))

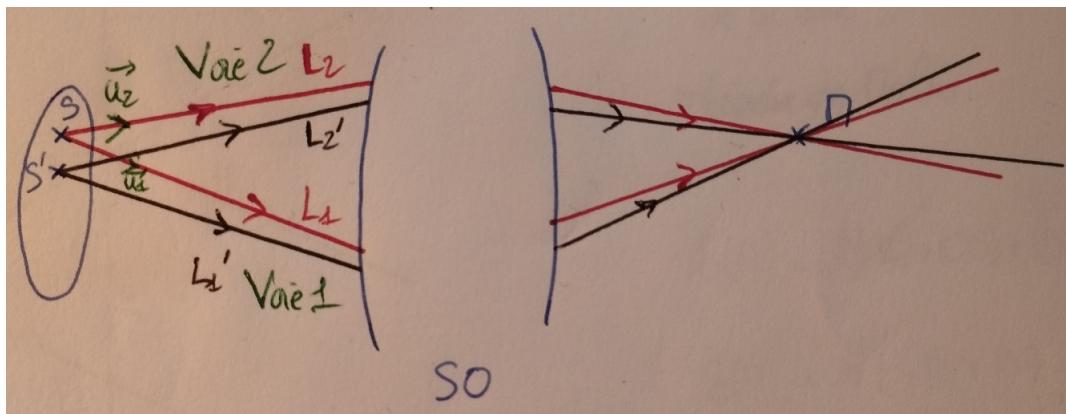


FIGURE 18.1 – Système interférométrique (SO) éclairé par une source étendue. Les voies 1 et 2 constituent les voies de l'interféromètre. S et S' sont deux points sources.

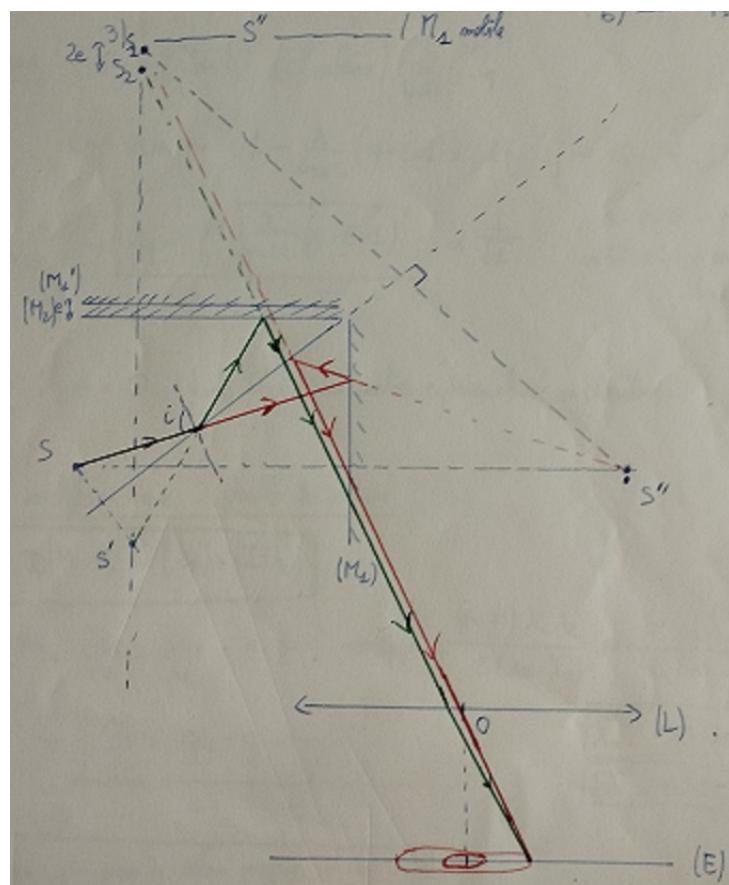


FIGURE 18.2 – Schéma équivalent du Michelson. S_1 et S_2 sont les images de S à travers respectivement la voie 1 (Miroir M_1) et la voie 2 (miroir M_2) de l'interféromètre. Le miroir (M'_1) est l'image de (M_1) à travers la séparatrice.

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

1. Types d'interférence pour le casque anti-bruit ?

Il y a un micro qui permet d'enregistrer le bruit ambiant. Le signal est ensuite analysé puis un haut-parleur génère un signal de bruit avec une phase exactement opposée à celui qui vient d'être enregistré pour que les deux signaux interfèrent destructivement. Il s'agit donc d'une division du front d'onde.

2. Utilisation des interférences à division d'amplitude ?

Regarder la structure spatiale d'un échantillon, voir des défauts de planéité des miroirs, mesurer la différence d'indice de réfraction d'un gaz, mesurer une variation de température.

3. Comment mesure-t-on l'indice de réfraction d'un gaz ?

En configuration lame d'air, on peut regarder comment changent les franges rectilignes lorsque l'indice de refraction n du milieu varie. Connaissant la taille du miroir, on peut remonter à n .

4. Quelle configuration pour la planéité des miroirs ?

Configuration coin d'air.

5. En configuration coin d'air, où sont localisées les interférences ?

On verra des franges au niveau des miroirs.

6. Pourquoi au niveau des miroirs ?

Il faut considérer deux points sources S_1 et S_2 proches et tracer les rayons issus de ces points et passant par un point P . Si P est proches du coin d'air, la différence de marche δ_1 entre les rayons issus de S_1 et celle entre les rayons issus de S_2 sont quasiment les mêmes (et égales à $2e(P)$) : il n'y a donc pas brouillage. En revanche, si P s'éloigne du coin d'air, δ_1 devient très différent de δ_2 et on a brouillage (cf. corrigé du TD d'optique sur les interférences).

Par ailleurs, une construction géométrique permet de montrer que le lieu d'intersection des rayons réfléchis correspondant à **un même rayon incident** (condition de localisation vu en 1.1, à savoir $\mathbf{u}_2 = \mathbf{u}_1$) est approximativement le plan faisant l'angle i (où i est l'angle d'incidence) avec $(M1')$. En pratique, cet angle est si petit (quelques minutes d'arc) que ce plan d'intersection est presque confondu avec $(M1')$ (Dunod Physique tout-en-un 2ème année, PC-PC* 2004).

7. Lorsque la source est ponctuelle, les interférences sont-elles localisées ?

Non. Elles le sont lorsque la source est étendue.

8. Si on a des trous d'Young et une source déplacée de b sur l'axe parallèle à l'axe des trous, comment seront les franges ?

Il y aura une différence de chemin optique additionnelle avant les trous. Les nouvelles franges obtenues se décalent de $\frac{-bD}{d}$, avec d la distance entre la source et les trous d'Young et D la distance entre les trous et l'écran.

9. Peut-il y avoir brouillage si on considère deux sources ponctuelles incohérentes ?

Oui si les deux systèmes de franges créés par les sources sont en anticoïncidence (les franges brillantes d'un système de franges se superposent aux franges sombres de l'autre système de franges).

10. Pour la lame d'air, pourquoi appelle-t-on les anneaux "anneaux d'égale inclinaison" ?

Un ordre d'interférence donné correspond à une inclinaison, c'est-à-dire à un même angle d'incidence des rayons lumineux.

11. Pour la lame d'air, est-ce qu'on a le même signe de réflexion des deux côtés ?

Non, $r_1 < 0$, $r_2 > 0$. Il y a un déphasage de π en plus. Dans le Michelson, on oublie car c'est plus compliqué que ça, il y a des traitements en plus. Ce qui compte c'est que le contact optique est défini non pas par la longueur géométrique mais par la longueur optique.

12. A quoi sert la compensatrice ? On pourrait s'en passer pour le laser en réglant la longueur entre les deux bras de sorte à compenser la différence de marche correspondant à l'épaisseur de la séparatrice.

Si la source est polychromatique, on ne peut pas trouver un pas du miroir qui compense la différence de marche pour toutes les longueurs d'onde car l'indice optique de la séparatrice dépend de la longueur d'onde, d'où la nécessité d'utiliser une compensatrice. Si une seule longueur d'onde, ce n'est pas nécessaire (mais ça n'existe pas dans la vraie vie).

13. Pourquoi tu utilises un verre anticalorique ?

Pour ne pas diffuser de la chaleur provenant de la source sur l'interféromètre, cela modifierait n qui dépend de la température (le Michelson est sensible à des variations d'indice de réfraction de l'ordre de 10^{-4} .)

14. Le laser He-Ne : 10 MHz. Lorsqu'on a fait le calcul on a trouvé 400 MHz. Pourquoi cette différence ?

En réalité, le spectre comporte plusieurs raies. L'enveloppe est à 400 MHz mais la largeur de chaque raie est beaucoup moins : 10 MHz semble raisonnable.

15. Que mesures-tu dans la tomographie ?

Les interférences associées à une certaine épaisseur.

Commentaires lors de la correction de la leçon

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) :

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates :

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) :

Bibliographie conseillée :

Leçon 19

Diffraction de Fraunhofer.

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Tout-en-un PC/PC*	M.-N. Sanz	Dunod (2022)	
Optique - Fondements et applications	J.P. Pérez	Dunod (2011)	
https://www.1kb.upmc.fr/cqed/teaching/teachingsayrin/	C. Sayrin		
Optique Physique	R. Taillet	de boeck (2015)	
Optique Physique	D. Mauras	PUF (2001)	

Commentaires des années précédentes :

- **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,
- **2014-2011** : Les conditions de l'approximation de Fraunhofer doivent être clairement énoncées. Pour autant, elles ne constituent pas le cœur de la leçon.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Licence 3

Prérequis :

- optique géométrique,
- modèle scalaire des ondes lumineuses,

- transformées de Fourier,
- microscopie optique ?



Le message essentiel de la leçon est que la figure de diffraction de Fraunhofer se trouve dans le plan image de la source qui éclaire l'objet diffractant

Introduction

I Conditions de Fraunhofer de la diffraction

I.1 Principe d'Huygens-Fresnel

Voir Pérez p263. Enoncé, faire le dessins. Introduire le facteur d'obliquité et dire qu'il est constant si on considère des rayons proches de l'axe optique.

La démo de Huygens-Fresnel est sur Wikipédia https://fr.wikipedia.org/wiki/Théorie_de_Kirchhoff.

Donner l'amplitude scalaire de l'onde $s(M)$ (prendre les notations de C. Sayrin).

I.2 Amplitude d'une onde à travers un diaphragme plan

Cf TD Clément Sayrin Diffraction (1).



On peut garder $\frac{e^{ikr}}{r} \sim \frac{e^{ikr}}{D}$ mais pour évaluer la phase $\mathbf{k} \cdot \mathbf{PM}$, il faut tenir compte des variations de $\mathbf{PM} = \mathbf{r}$ à l'échelle de λ et l'on garde donc les ordres plus élevés du développement.

I.3 Conditions et approximations de Fraunhofer

On néglige le terme quadratique en r^2 dans la phase de l'onde. Enoncer les conditions pour avoir le terme de Fraunhofer nul voir Sextant p139 :

- onde plane ($d = 0$) à l'infini ($D = 0$), il suffit de placer une source lumineuse dans le plan focal objet d'une lentille convergente et observer la figure dans le plan focal image d'une autre lentille convergente,
- en pratique, condition pas très restrictive car : onde plane (source à l'infini) mais $kr^2 \ll 2D \Leftrightarrow D \gg \frac{r^2}{4\lambda}$. Application numérique : pour un laser

de longueur d'onde $\lambda = 648nm$, on trouve $D \gg 500m$ et si $r = 1cm$, $D \gg 5m$ si $r = 1mm$, $D \gg 5\mu m$ si $r = 1\mu m$. Il est très facile d'être dans les conditions de Fraunhofer pour les petits objets diffractants ! Pour les objets plus grand, il faut faire l'image de la source lumineuse par une lentille,

- cas particulier de la source sur l'écran ($d=-D$) (à omettre, garder pour les questions?)

On voit quand même que l'amplitude de l'onde résultante est la transformée de Fourier de la fonction $t(x, y)$ de l'objet diffractant. Il y a une relation de réciprocité entre les distances angulaires de la figure de diffraction et les distances dans le plan d'ouverture de l'objet diffractant.

Transition : on va mettre en application ce qu'on vient de détailler en observant la figure de diffraction d'objets simples.

II Deux exemples de systèmes diffractants

II.1 Diffraction par une fente

Faire le calcul + la manip. Il faut juste prendre $t(x, y) = \text{rect}_x(-a/2, a/2)$.

Manip qualitative : mesure d'une largeur de fente. Voir Poly TP Montrouge Diffraction. On a besoin

- barette CCD + logiciel MIGHTEX,
- laser + boîts + lentille $f=50\text{mm}$,
- ordinateur avec Spectra Suite + câble connexion caméra,
- fentes sources de différentes taille + fente de taille variable,

Montrer visuellement que plus la largeur de la fente diminue, plus l'espacement entre les maxima est grand. Parler de la réciprocité entre espace réel et espace de Fourier.

Transition : avec l'étude de la figure de diffraction de la fente, on peut en déduire celle d'un trou.

II.2 Diffraction par un trou d'Young

Le faire rapidement sur slide ou en estimant à l'aide de la formule précédente : un trou de rayon a est contenu entre deux carrés de côté $\sqrt{2}a$ donc :

$$\frac{\lambda}{a} < \theta < \frac{\sqrt{2}\lambda}{a} \sim 1.4 \frac{\lambda}{a} \quad (19.1)$$

En prenant la moyenne : $\theta \sim (1.2 \pm 0.2) \frac{\lambda}{a}$. Le calcul réel se fait dans le Taillet p154.

Conséquence voir Perez p276-277 :

- parler du critère de Rayleigh donnant la résolution latérale maximale d'un microscope optique standard,
- **Attention, nécessite le théorème de Babinet.** slide : tâches de diffraction circulaire autour de la Lune attribuées aux gouttellettes d'eau/glace dans l'atmosphère. Calcul du diamètre "moyen" des gouttes d'eau : $\theta = \frac{1.22\lambda}{D}$, si on prend $\theta \sim 6\theta_L = 0.5^\circ$, on trouve en prenant $\lambda = 600\text{nm}$: $D = \frac{1.22 \times 600e^{-9}}{6 \times 0.5\pi/180} = 14\mu\text{m}$

Apodisation voir Mauras p258 et Clément Sayrin Diffraction (2) : pour observer les exoplanètes de faible intensité lumineuse proche des étoiles qui ont une très grande intensité lumineuse, on peut choisir de mettre un masque dont la fonction de transmission de la lentille décroît de l'unité en son milieu à zéro à son bord : réduit l'intensité de des lobes secondaires de diffraction d'un objet très lumineux.

II.3 Ensemble de structure diffractante (peut sauter si besoin, ou en ouverture)

Si on prend pleins de trous d'Young et qu'on connaît leur répartition spatiale,

III Applications de la diffraction

Au choix : expérience d'Abbe avec le filtrage spatiale, microscopie à contraste de phase,

IV

Conclusion

Ouverture sur la diffraction des rayons X. Conditions de Laue.

Leçon 20

Diffraction sur des structures périodiques

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Physique du solide	Ashcroft et Mermin	EDP Sciences	
Tout-en-un MP	M.-N. Sanz	Dunod (2009)	
Optique Physique	R. Taillet	de boeck (2006)	
Optique Physique et électronique	D. Mauras	PUF (2011)	
http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/optiondu/reseauphase.html	Simulation réseau	Université du Mans	
https://www.lkb.upmc.fr/cqed/wp-content/uploads/sites/14/2020/09/optique_TD_diffraction_1.pdf	C. Sayrin		

Commentaires des années précédentes :

- **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,
- **2014-2012** : 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.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Licence

Prérequis :

- Principe de retour inverse de la lumière, théorème de Malus
- Diffraction de Fraunhofer, diffraction par une fente rectangulaire
- notion de cohérence spatiale et temporelle

Déroulé détaillé de la leçon :

La diffraction, en particulier dans les conditions de Fraunhofer, permet de faire le lien entre les caractéristiques de l'objet diffractant et la figure de diffraction résultante. On va dans cette leçon s'intéresser aux propriétés d'objet diffractant possédant des structures périodiques et montrer en particulier deux choses : 1) si on connaît les caractéristiques de l'objet diffractant, on peut connaître les caractéristiques de la source, 2) on peut utiliser la figure de diffraction pour remonter à la structure interne de l'objet diffractant. On verra quelles limitations on obtient dans ces deux visions.

L'objet périodique par excellence est le réseau.

I Diffraction par un réseau

Voir D. Mauras p194.

I.1 Définition

Il en existe de différents types (amplitude par transmission, phase par transmission, amplitude par réflexion (voir la dernière partie) et phase par réflexion). On

va s'intéresser pour l'instant aux réseaux d'amplitude par transmission. Faire un dessin en définissant le pas du réseau.

I.2 Formule fondamentale du réseau

On va considérer ici un montage de type Fraunhofer (source à l'infini, observation à l'infini) : faire le dessin (voir D. Mauras p195) en forçant le trait sur le réseau pour faire apparaître l'angle θ_0 . Les ondes diffractées par les fentes donnent lieu à des interférences non localisées. On les observe à l'infini dans la direction θ , réalité dans le plan focal de la lentille (L_2) au point $M(x)$. Le principe de retour inverse (source fictive en M) et le théorème de Malus nous permet de montrer que **pour avoir interférences constructives** au point d'observation M :

$$\sin(\theta_p) - \sin(\theta_0) = \frac{p\lambda}{na} \quad (20.1)$$

qui est la formule fondamentale des réseaux. Remarque : pour un réseau blazé (cf <http://olivier.sigwarth.free.fr/CoursTS2/Ch5/Chap5.pdf>), on remplace $\sin(\theta_p)$ par $\sin(\theta_p + \alpha)$. p est l'ordre d'interférence :

- $p = 0$: la lumière se propage en ligne droite selon les lois de l'optique géométrique,
- l'ordre d'interférence est borné car $-1 \leq \sin(\theta_p) \leq 1 \rightarrow |p| \leq \frac{a}{\lambda}$ donc plus a est grand, plus on peut avoir des ordres d'interférences élevés. Plus la longueur d'onde est faible, plus il y a d'ordres d'interférences. Ex : pour un réseau à 500 traits/mm, si $\lambda = 550$ nm, $p=-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$ (7 ordres d'interférences).

Utilisation en lumière polychromatique : comme θ_p dépend de λ , le réseau est donc un disperseur de la lumière. D'autre part :

$$d\theta_p \cos(\theta_p) = p \frac{d\lambda}{a}$$

$$\frac{d\theta_p}{d\lambda} = \frac{p\lambda}{a\sqrt{1 - (\sin(\theta_0) + p\frac{\lambda}{a})^2}}$$

On commente :

1. Pour un ordre donné, la dispersion augmente avec la longueur d'onde contrairement au prisme,
 2. la dispersion augmente avec l'ordre d'interférence,
- On va voir visuellement tout ça à l'aide de l'expérience ci-après.

I.3 Mesure des raies spectrales de la lampe à vapeur de mercure

On va ici faire une application de l'utilisation des réseaux.

Matériel :

- un réseau (prendre celui où on peut changer le pas du réseau ENSP 3637), choisir le 3000 traits/mm,
- lampe à vapeur de mercure + condenseur de 8cm,
- une lentille convergente de 15-20cm de focale + une autre de focale 10cm,
- une fente réglable,
- un écran blanc avec une feuille blanche et du scotch
- un miroir, une règle de 1m (ou un mètre).

Expérience quantitative : On dispose d'une source à vapeur de mercure. On fait passer la lumière par une fente source de largeur réglable. On met une lentille de focale 15-20cm pour faire une image sur un écran éloigné. On intercale un réseau entre les deux. On oriente le réseau pour obtenir le minimum de déviation. On mesure l'angle $\tan D_{p,min} = \frac{d_{écran}}{L_{écran-reseau}}$. On en déduit λ (avec incertitudes) la formule des réseaux à l'angle de déviation minimum.

Mettre sur slide l'angle de déviation minimum :

$$\begin{aligned} D_p &= \theta_p - \theta_0 \\ \sin \theta_p &= \sin(\theta_0) + p \frac{\lambda}{a} \\ \frac{dD_p}{d\theta_0} &= \frac{\cos(\theta_0)}{\cos(\theta_p)} - 1 = 0 \rightarrow \cos(\theta_p) = \cos(\theta_0) \end{aligned}$$

Démontrer que D_p est un angle de déviation minimum. En prenant $\theta_{p,min} = -\theta_{0,min}$, le rayon émergeant est symétrique du rayon incident par rapport au plan du réseau et l'angle de déviation vaut :

$$2 \sin \left(\frac{D_{p,min}}{2} \right) = p \frac{\lambda}{a} \quad (20.2)$$

Transition : Ce qu'on a vu pour l'instant c'est qu'on peut analyser le spectre d'émission d'une source polychromatique à partir des ordres d'interférences. Pour

l'instant on a considéré une interférence entre deux ondes du réseau. On va voir ci-après ce qui se passe lorsqu'on a interférences avec toutes les fentes. On va voir que cela fait intervenir deux nouvelles notions : le facteur de forme et le facteur de structure.

II Facteur de structure et facteur de forme d'un réseau

Voir Polycopié Diffraction (1) exo 2 qu3 de Clément Sayrin.

II.1 Interférences à N ondes

Voir Dunod p 757-759. Faire le calcul pour les interférences à N ondes, parler du contraste, de la finesse, etc... Montrer que l'intensité résultante donne le facteur de structure qui est la transformée de Fourier de la structure du réseau. Cela donne des informations sur les symétries du réseau !

Transition : et si on prend des fentes larges ?

II.2 Facteur de forme

Voir Taillet p141. L'intensité est modulée par un terme provenant de la forme elle-même de la structure diffractante. C'est le facteur de forme qui dépend donc de la nature de l'objet diffractant : cela renseigne sur la nature interne de l'objet !

III Application : diffraction des solides cristallins

Voir Kittel Chapitre 2.

III.1 Conditions de diffraction de Bragg

La condition des interférences constructives entre deux plans réticulaires séparés par la distance d s'écrit :

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (20.3)$$

Remarque : pour qu'il y ait diffraction, on doit avoir $2d \sim 5\text{\AA} \leq \lambda$ ce qui montre qu'on ne peut pas utiliser la lumière pour résoudre la structure cristalline.

Dire que le facteur de structure dépend de la densité électronique autour des atomes et donc qu'il sonde la nature des atomes à l'intérieur du cristal et que le facteur de forme va être modifié suivant la maille du cristal.

Conclusion

Ouverture sur la diffraction des rayons X. Méthode de Laue.
Tâches de diffraction des papillons <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/cellules-et-molecules/biophysique/la-coloration-des-ailes-de-morpho-menelaus?>

Leçon 21

Absorption et émission de la lumière

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Optique Physique	R. Taillet	de Boeck	
Physique Statistique	Landau et Lifshitz	Ellipses	
Poly laser	A. Maitre		
Sextant		Hermann	
Tout-en-un PC/PC*	M.-N. Sanz	Dunod (2019-2022)	
Physique en PC/PC*	Pascal Olive	Ellipses	
Laser	CAGNAC		
Optique	S. Houard	de boeck (2011)	

Commentaires des années précédentes :

- **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,
- **2014-2011** : 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.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Licence 3

Prérequis :

- diffraction par un réseau,
- modèle du corps noir, loi de Planck,
- physique statistique : loi de Boltzmann

Déroulé détaillé de la leçon :

Spectre émission discret (lumière spectrale) vs spectre d'émission continu (lumière corps noir).

L'approche classique : modèle de Drude-Lorentz qui prédisait relativement bien des fréquences d'absorption lumineuse dans les isolants. Mais il restait deux problèmes :

- structure discontinue des spectres atomiques,
- divergence de la répartition spectrale du rayonnement thermique dans le domaine ultraviolet ("catastrophe ultraviolette")

Il faut attendre que Planck et Einstein proposent la quantification des niveaux d'énergie des atomes/ions/molécules.

On va dans un premier temps faire une étude phénoménologique de l'absorption et de l'émission spontanée.

I Absorption et émission spontanée

Etudions d'abord ce qu'il se passe pour une collection d'atomes.

I.1 Spectre d'émission d'un atome

Faire un dessin. Einstein : quantification des niveaux d'énergie des atomes (raies de l'hydrogène mais aussi d'autres espèces) en utilisant les relations de Planck-Einstein. Présenter spectre d'émission et d'absorption d'éléments chimiques.

Utilité : composition de l'atmosphère d'une planète par exemple <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/atmospheres-systeme-solaire.xml#analyse>

I.2 Mesure spectroscopique du spectre d'émission du mercure Hg

Expérience quantitative : On se propose ici de mesurer quelques raies d'émission du spectre de la lampe à vapeur de mercure. Pour cela on a besoin de :

- un réseau (prendre celui où on peut changer le pas du réseau ENSP 3637), choisir le 3000 traits/mm mais on peut montrer ce que ça change en changeant le pas,
- lampe à vapeur de mercure + condenseur de 8cm,
- une lentille convergente de 15-20cm de focale,
- une fente réglable,
- un écran blanc avec une feuille blanche et du scotch.

On fait l'image de la fente sur l'écran à une distance assez éloignée. On intercale le réseau juste après la lentille. On mesure la distance $L \pm u(L)$ entre le réseau et l'écran. On cherche le minimum de déviation en tournant le réseau. Au minimum de déviation, $\tan D_{pm} = \frac{d_{écran}}{L}$. On mesure la distance à l'écran entre l'ordre 0 et l'ordre 1 (ou 2 si on peut). On en déduit λ_p :

$$\lambda_p = \frac{2a}{p} \sin \left(\frac{\arctan \frac{d_{écran}}{L}}{2} \right) \quad (21.1)$$

Comparer aux longueurs d'onde attendues pour le spectre du mercure (voir slide et https://fr.wikipedia.org/wiki/Raie_spectrale).

On a bien une quantification des niveaux d'énergie !

I.3 Mise en évidence expérimentale de l'absorption

Faire le spectre d'absorption/transmission de la rhodamine. On prend une lampe quartz-iode, et on éclaire la rhodamine avec un condenseur. On regarde avec une fibre optique connectée à spectra-suite sur l'ordi. On fait le blanc et le noir. On regarde le spectre d'absorption. Youhou.

Transition : On va maintenant donner l'approche d'Einstein pour modéliser l'émission et l'abortion.

II Modèle d'Einstein

En plus de l'absorption et l'émission qu'on a mis en évidence dans la partie précédente, Einstein a l'idée de rajouter un terme d'émission stimulée pour rendre compte des propriétés microscopiques du rayonnement thermique.

II.1 Probabilités de transition

Voir Pascal Olive p786 ou Dunod p1118.

Soit un système à deux niveaux d'énergie E_1 et E_2 associée aux états propres $|1\rangle$ et $|2\rangle$. On note N_1 et N_2 la population de ces niveaux telles que $N_1 + N_2 = N = \text{cste.}$

La lumière que reçoit ce système est caractérisée par une densité spectrale $u(\nu) = \frac{du_{em}}{d\nu}$ (en J.s.m^{-3}) avec la densité volumique d'énergie EM contenue dans l'intervalle $[\nu - \frac{\Delta\nu}{2}, \nu + \frac{\Delta\nu}{2}]$ $du_{em} = d\left(\frac{\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0}\right) = u_\nu d\nu$.

Comme N se conserve : $\frac{dn_1}{dt} = -\frac{dn_2}{dt}$ et donc :

$$\frac{dn_2}{dt} = \left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{em.st} + \left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{em.sp} + \left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{abs} \quad (21.2)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = -B_{21}N_2u(\nu_{12}) - A_{21}N_2 + B_{12}N_1u(\nu_{12}) \quad (21.3)$$

II.2 Relations entre les coefficients d'Einstein

Voir P. Olive p786. Dire deux choses :

- on se place en régime stationnaire,
- le système {N atomes} est placé dans un milieu thermostaté à T quelconque baignant dans le rayonnement d'équilibre à cette température.

La proba d'occupation des deux niveaux à l'équilibre est donnée par la loi de Boltzmann $n_i = \frac{N_i}{N} = e^{\frac{E_i}{k_B T}}$. Le rapport $\frac{N_1}{N_2} = e^{\frac{E_2 - E_1}{k_B T}} = e^{\frac{h\nu_{12}}{k_B T}}$.

En prenant un rayonnement électromagnétique de type corps noir : $u(\nu_{12}) = \frac{8\pi h\nu_{12}^3}{c^3}$

II.3 Processus de transfert d'énergie

La puissance transférée de l'atome vers le champ $P_{at \rightarrow ch} = -h\nu_0 \frac{dn_2}{dt} = h\nu_0 B(n_2 - n_1)u(\nu_0)$. On distingue alors deux régimes :

- Si $n_1 > n_2$, $P_{at \rightarrow ch} < 0 \longrightarrow$ Absorbtion
- Si $n_1 < n_2$, $P_{at \rightarrow ch} > 0 \longrightarrow$ Inversion de population

Initialement $n_1 = 1, n_2 = 0$:

- $n_1(\infty) = \frac{A+Bu(\nu_0)}{A+2Bu(\nu_0)}$
- $n_2(\infty) = \frac{Bu(\nu_0)}{A+2Bu(\nu_0)}$

III Application au laser

III.1 Principe

Parler de

III.2 Modèle à 4 niveaux d'énergie : le laser de TP He-Ne

Conclusion

Modèle de l'électron élastiquement lié qui prédit l'absorption électromagnétique de la matière et le rayonnement dipolaire ?

Leçon 22

Propriétés macroscopiques des corps ferromagnétiques

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Électromagnétisme. Tome 4 - Milieux diélectriques et milieux aimantés	M. Bertin, J.P. Faroux et J. Renault	Dunod (1984)	
Electromagnétisme - Fondements et applications	J-Ph. Pérez	Dunod 4ème édition (2019)	
Physique Spé. PSI*, PSI	S. Olivier, C. More, H. Gié	Tec & Doc (2000)	
Physique de l'état solide	C. Kittel	Dunod 7ème édition (1998)	

Commentaires des années précédentes :

- **2017** : L'introduction des milieux linéaires en début de leçon n'est pas judicieuse,
- **2016** : Un bilan de puissance soigné est attendu,
- **2010-2009** : L'intérêt du champ H doit être clairement dégagé. L'obtention expérimentale du cycle d'hystérésis doit être analysée.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Licence 3

Prérequis :

- Electrocinétique
- Induction
- Notions sur la paramagnétisme et le diamagnétisme
- Milieu LHI

Déroulé détaillé de la leçon :

Introduction

Introduction sur les matériaux ferromagnétiques en prenant l'exemple de la magnétite (Fe_2O_3). Définition : corps qui, sous l'action d'un champ EM extérieur, s'aimante très fortement.

I Aimantation d'un corps ferromagnétique (1min15)

I.1 Magnétostatique dans un milieu aimanté

Dans la matière, il y a des électrons et des atomes qui portent des moments magnétiques.

Définition de l'aimantation : $\mathbf{M} = \frac{d\mathbf{m}}{dt}$ (en $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$).

Vecteur excitation magnétique : $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M}$.

Equation de Maxwell-Ampère : $\nabla \times \mathbf{H}_{\text{libre}}$. Equation de Maxwell-flux : $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$.

Pour un LHI : $\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$, avec χ_m la susceptibilité magnétiques.

Pour les milieux paramagnétiques et diamagnétiques, $|\chi_m| \ll 1$. Alors que pour les ferromagnétiques :

- $\chi_m(\mathbf{H})$: relation non linéaire entre \mathbf{M} et \mathbf{H} .
- $|\chi_m| \gg 1$

I.2 Courbe de première aimantation (7min10)

Courbe $M(H)$ pour un matériau ferramoagnétique initialement non aimanté : (1) courbe linéaire pour les petits H puis (2) fortement croissante puis (3) sature

progressivement jusqu'à M_{sat} .

$\mu_0 M_{sat}$ est le champ magnétique maximal d'un ferromagnétique à T donnée et dépend du matériau. $M_{sat}(Fe) = 2.1T$

I.3 Interprétation microscopique (9min12)

Slide : Domaines de Weiss. Déplacement des domaines réversible à faible B , mais irreversible pour B plus élevé du fait de la présence d'impuretés dans le matériau.

Une propriété des ferromagnétiques est la canalisation des lignes de champs magnétiques. Slide : illustrations pour différentes géométries. Pour un ferromagnétique torique, les lignes de champ sont complètement canalisées.

II Cycle d'hystérésis (14min)

Présentation de l'expérience. Transformateur : un primaire et un secondaire. C'est l'expérience "Étude du cycle d'hystérésis du fer d'un transformateur" du TP Conversion de puissance électrique, version 2023.

II.1 Etude du noyau de fer d'un transformateur(15min)

Schéma électrique du montage (cf. TP Conversion de puissance électrique)

Théorème d'Ampère : $LH = n_1 i_1 + n_2 i_2$ L : longueur totale du tore (fer doux), n_i nombre de spires de la bobine i . $H = \frac{n_1 i_1 + n_2 i_2}{L}$ donne (avec i_2 négligeable devant i_1 car la résistance imposée dans le secondaire ($\sim 10 \text{ k}\Omega$) associée est bien plus élevée que celle du primaire ($\sim 30 \Omega$)) $i_1 = \frac{L}{n_1} H$. Ainsi, si on mesure la tension aux bornes de la résistance du circuit primaire :

$V_x = Ri_1 = \frac{RL}{n_1} H$ avec ici $\frac{RL}{n_1} = 62.4V/(Am^{-1})$ qu'on place sur la voie 1 de l'oscillo.

Dans le circuit secondaire, on a (Loi de Faraday) : $e = -\frac{d\phi}{dt} = -n_2 S \frac{dB}{dt} = R'i_2 + \int \frac{i_2}{C}$ (cf. TP). R' et C sont choisies de telle sorte que $\int \frac{i_2}{C}$ soit négligeable devant $R'i_2$. Il vient :

$$i_2 = \frac{S}{R'} \frac{dB}{dt}.$$

Conséquences, aux bornes du condensateur : $U_c = \int \frac{n_2 S}{c R'} \frac{dB}{dt} dt$. Finalement :

$$V_y = U_c = \frac{n^2 S}{R' C} B \text{ qu'on place sur la voie 2 de l'oscillo.}$$

Début de l'expérience (24min45)

- Visualisation du cycle d'hystérésis avec le mode XY.
- Tracé du cycle $B(H)$ au tableau et définition du champ coercitif H_c (pour $B = 0$) et du champ rémanent B_r (pour $H = 0$).
- Mesure expérimentale de B_r . Valeurs : $V_y = 2.70 \pm 0.02$ V donne $B_r = 0.532 \pm 0.004 T$.
- Mesure expérimentale de H_c . Valeurs : $V_x = 2.10 \pm 0.01$ V donne $H_c = 313 \pm 1$ A/m. Valeur caractéristique des ferro doux. Plus cette valeur est faible, plus l'excitation à devoir appliquer pour désaimanter le matériau sera faible : ce type de matériau se désaimante facilement.

On distingue deux types de ferro (slide tableau comparatif). Ferro doux (Transformateurs, inductance à haute fréquence) et ferro durs (application générateur électrique, RMN, etc.).

II.2 Bilan de puissance (35min38)

Loi des mailles : $Ui_1 + ei_1 - Ri_1 = 0$. Premier terme : ; dernier terme : puissance dissipée par effet Joule. $ei_1 = -\frac{d\phi}{dt}i_1$. $\delta W = -d\phi i_1 = -\frac{SHL}{n_1} = dB$. $P = \frac{1}{T}SL \oint H_u dB$.

Conclusion (39min50)

Application : disques durs. Fin : 40min35.

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

Q : Si je lis votre relation, si j'augmente le nombre de spires, je vais diminuer la perte par hystérésis ? Non, il y a une erreur dans ma formule, elle ne dépend pas du nombre de spires.

Q : Si je regarde le cycle d'hystérésis, le champ B sature ? Non, il continue à croître linéairement.

Q : Pourquoi on utilise des ferro doux pour l'inductance à haute fréquence. ? Ce qui compte dans une inductance c'est la variation du flux. Mais

dans le ferro dur, quand c'est saturé, certes le champ est fort, mais il n'est plus sensible au champ extérieur. Un ferro doux, en première approximation, c'est linéaire et la pente est la susceptibilité. Mais pour le ferro dur, la pente est nulle.

Q : Pourquoi à haute fréquence ? Pour minimiser les pertes par courants de Foucault.

Q : Quels matériaux qui minimisent ces pertes à hautes fréquence ? Utiliser des isolants (ferrites), on va limiter ainsi des pertes par courants de Foucault.

Q : Est-ce que la canalisation des champ est générique à tous les ferro ? Ce n'est pas le cas pour les ferros durs, que pour les ferros doux. Toutes les applications qui utilisent χ ou μ_r très grand c'est les ferro doux, car il n'y a plus de pente pour les ferro durs.

Q : Dans quel état sont les ferromagnétiques ? Solides cristallin. L'état ferro provient d'interaction au niveau des atomes qui n'existent pas à l'état fluide.

Q : L'aimantation à saturation et le champ coercitif dépendent des matériaux ? Varie de quelques magnétions de Bohr mais reste du même ordre de grandeur alors que H_c varie beaucoup : un ferro doux a un champ coercitif faible (10^{-3} T), un ferro dur très grand (0.1 T) matériau à un autre.

Q : Sur l'histoire du transformateur, vous avez appliqué le théorème d'Ampère. C'est évident que $\oint H \cdot dl = HL$? Il faut utiliser les relations de passage des champs B et H pour démontrer la canalisation des lignes de champs dans le ferro en l'absence de courants surfaciques à l'interface fer→air. Ensuite, les symétries et invariances du tore donnent $\mathbf{H} = H(r)\mathbf{e}_\theta$ et le théorème d'Ampère le long d'une ligne de champ permet d'avoir la formule donnée si on considère que la section du tore est faible devant la distance à l'axe..

Q : Dans un électroaimant ? Il n'y a pas conservation de la norme de H . Pour relier H dans l'entre-fer et dans le milieu, il faut utiliser la conservation du flux.

Q : Pourquoi le système forme les domaines de Weiss ? Au niveau microscopique, il y a une compétition entre l'énergie qu'il va falloir fournir pour créer ces interfaces et le coût en énergie pour créer un champ via l'alignement

des moments magnétiques.

Q : La taille des domaines ? De l'ordre du micromètre.

Q : Est-ce qu'il y a des directions privilégiées au départ dans champ extérieur ? Est-ce que je peux avoir une courbe d'hystérésis qui dépend du champ B ? Oui, il y a un axe de facile aimantation. Les champs coercitifs vont être plus forts dans l'axe de facile aimantation. Cela va exister dans des monocristaux. Les axes de facile et difficile aimantation sont définis par rapport à l'orientation cristalline du matériau et des interactions entre les moments magnétiques dans le matériau. Il n'y a pas de raison pour que l'orientation du domaine soit dans la direction du champ appliqué.

Q : Quels sont les conditions qui vous permettent de lire directement B ? $e = U_{R'} + U_c = R'i_2 + \frac{1}{jC\omega}i_2^2 = R'(1 + \frac{1}{jRC\omega})i_2$. On veut alors $R'C \gg \frac{1}{\omega}$ avec $\omega = 2\pi f$ et $f = 50$ Hz (fréquence du secteur).

Q : Les applications des ferros durs ? Tous les aimants permanents.

Commentaires lors de la correction de la leçon

Agréable à suivre. Le rythme était un peu lent. Parfois vous répétez un peu, c'est très bien pour un vrai cours mais pas nécessaire pour une leçon d'agrégation, ce qui permet de gagner un peu de temps pour la partie ferro dur/ferro doux qui est un point central, et aussi pour l'histoire du $\nabla \cdot B$. Ne pas faire la démonstration pour la canalisation est un choix, vous auriez pu le faire sur transparent pour gagner du temps. Votre exploitation de la manipulation est remarquable. Il faut donner les chiffres des ordres de grandeurs.

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) :

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates :

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) :

Bibliographie conseillée :

Leçon 23

Mécanismes de la conduction électrique dans les solides

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Physique des Solides (Chap 1 à 3)	N. Ashcroft et D.Mermin	EDP Sciences (2002)	2-86883-577-5
Slides de cours	Gwendal Fève		Site Montrouge
Physique des Solides	C. Kittel	Dunod	
Site ferrarithierri pour télécharger BUP 550	A. Guinier, E. Guyon, J Matricon, C. Taupin	BUP	

Commentaires des années précédentes :

- **2017** : Cette leçon ne concerne pas que la conduction dans les métaux,
- **2014** : Dans la présentation du modèle de Drude, les candidats doivent être attentifs à discuter des hypothèses du modèle, en particulier celle des électrons indépendants. Le jury se permet par ailleurs de rappeler aux candidats que les solides ne sont pas tous métalliques.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon :

Prérequis :

- loi d'Ohm, mécanique newtonienne,
- statistique de Maxwell-Boltzmann, modèle du gaz parfait,

- statistique de Fermi-Dirac
-

Introduction

On connaît et on utilise trivialement l'électricité, ça fait partie de la culture générale scientifique de savoir qu'il existe des matériaux conducteurs et des matériaux isolants (c'est même quelque chose qu'on voit au collège avec des expériences permettant d'allumer une ampoule avec du caoutchouc, du bois, du cuivre, ...). On va voir dans cette leçon que cette notion naturelle n'est en réalité explicable que par la mécanique quantique et que les modèles classiques échouent à rendre compte expérimentalement ce qui se passe.

I Approche microscopique classique

I.1 Modèle de Drude (1902) 10min max

Contexte historique : découverte de l'électron par Thomson (1899), avant expérience de Rutherford.

Cristal métallique : [grosses sphères chargées + avec des électrons de cœur] = ions métalliques + électrons de valence pour assurer électroneutralité.

Remarque : $n_{gaz} = 10^{25} \text{ m}^{-3}$ tandis que $n_{e^-} = 10^{29} \text{ m}^{-3}$, cf p4 Ashcroft.

Hypothèses :

- pas d'interaction entre les électrons et les ions, et entre les électrons et les électrons : "électrons libres",
- **collisions et changement de vitesse instantanées** entre les électrons de cœur et les électrons de valence,
- électrons de valence (conduction) se déplacent en ligne droite jusqu'à collision avec proba $1/\tau$. τ est **le temps de collision** ou libre parcourt moyen, temps moyen de propagation entre deux chocs,
- **chaos moléculaire**, la distribution des vitesses suit une loi de Maxwell-Boltzmann comme le gaz classique, la direction des électrons est aléatoire. L'équilibre thermodynamique local des électrons avec leur entourage par le biais des collisions (seul mécanisme restant) :

Ce modèle décrit relativement bien la conductivité dans un métal. Déduire équation du mouvement +

I.2 Mise en défaut pratique du modèle de Drude

Bien fait dans le BUP.

Voici ce que Drude prévoit en supposant que la vitesse des électrons obéit à la statistique de Boltzmann :

- dans un modèle de gaz parfait, la vitesse moyenne des électrons est : $v^* = \sqrt{\frac{3k_B T}{m_e}} = \frac{l}{\tau}$ (utiliser le théorème d'équipartition).
- comme $\tau = \frac{\sigma m_e}{N_e e^2}$ avec le modèle de Drude, on obtient $\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{T}}$

Manip quantitative : mesure 4 points d'un morceau de cuivre à différentes températures. Montrer (si possible) que la résistivité est linéaire en température.

- en utilisant $1/2mv^2 = 3/2k_B T$, on trouve $v = 10^5 \text{ m/s}$ alors que $v_F = 10^6 \text{ m/s}$ et indépendante de T ,
- quid des matériaux isolants ? semi-conducteurs ?
- effet Hall classique dans l'aluminium (p18 Ashcroft) montre que n dépend fortement de B appliqué, ce qui est inenvisagable dans le modèle de Drude + constante de Hall parfois positive

Conclusion : il faut passer à un autre modèle plus poussé : un modèle quantique.

II Modèle quantique des électrons libres

Electrons obéissent à la statistique de Fermi-Dirac et non à la statistique de Maxwell-Boltzmann.

II.1 Modèle des électrons libres

Cf Kittel chap 8 ou Ashcroft chap 2 et 13. Modèle de Sommerfeld. Faire les calculs Justifier qu'on peut se placer à $T=0\text{K}$.

III Théorie des bandes

III.1 Electrons dans un potentiel périodique

Modèle : électrons en interaction avec le potentiel périodique du réseau cristallins. Cf Kittel (chap 7) + TD 1 Physique des Solides : mettre en prérequis pour les calculs.

III.2 Bandes d'énergie

Slide : schéma bande avec isolant+ tableau périodique

III.3 Remplissage des bandes

Distinguer métaux, semi-conducteurs et isolant. Prévoir lesquels seront métalliques avec le demi-remplissage, lesquels seront isolants. Montrer que ça ne marche pas toujours.

III.4 Conductivité dans un semi-conducteur

Densité d'état varie en $\exp(-\Delta/k_B T)$ donc σ aussi.

Mesure de la conductivité dans un semi-conducteur dopé pour déterminer le gap., cf TP semiconducteurs. Durée 30min environ, $\Delta_{exp} = 0.6\text{eV}$ alors que $\Delta_{th} = 0.7\text{eV}$. Interprétation : matériel vieux, gap a pu changer. Matériau pas pur.

IV Conclusion

Ouverture sur l'ingénierie des semi-conducteurs : micro-électronique, jonctions pn, transistors. Prix Nobel 2014 pour l'invention de la diode bleue (en 1992).

Ouverture sur la supraconductivité (slide supra mercure).

Ouverture possible sur la conduction thermique, loi de Wiedemann-Franz.

Leçon 24

Phénomènes de résonance dans différents domaines de la physique

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Mécanique	J.M Brébec	HPrépa	

Commentaires des années précédentes :

- **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.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Licence 3

Prérequis :

- Mécanique newtonienne
- Optique ondulatoire

— Electrocinétique

Déroulé détaillé de la leçon :

Introduction

Définition : pour un système auquel qu'on soumet à une excitation sinusoïdale de pulsation ω , la réponse du système est maximale à la pulsation ω_r , appelée fréquence de résonance.

I Oscillateurs harmoniques forcés

I.1 Résonance en vitesse en régime forcé

Attention, faire la discussion sur la phase. Interprétation énergétique possible.

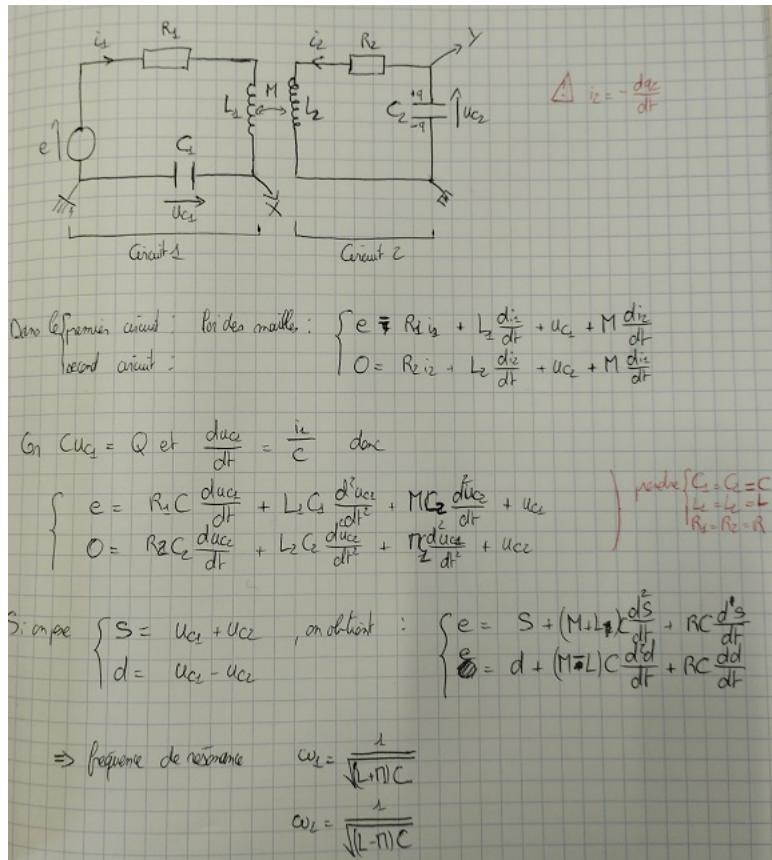
I.2 Équivalent electrocinétique

Démontrer la résonance en tension de la capacité d'un circuit RLC série.

Déterminer la fréquence de résonance et comparer avec les valeurs obtenues pour le RLC-mètre. On peut aussi observer l'évolution de la résonance à la changement de la résistance, le relié au facteur de qualité.

II Oscillateurs couplés

Interprétation en terme d'excitation de mode propre.



Expérience : montrer l'influence du couplage sur la résonance du premier circuit RLC à l'aide d'un deuxième circuit RLC. Intérêt pratique ?

III Cavité résonante

III.1 Cavité Fabry Pérot

III.2 Intensité transmise

Calcul possiblement à faire soit hyper rapidement, soit en prérequiss.

III.3 Finesse

Leçon 25

Oscillateurs ; portraits de phase et non-linéarités.

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
https://uhincelin.pagesperso-orange.fr/LP49_BUP_portrait_phase_oscil.pdf	H. Gié	BUP n°744	
https://www.lpens.ens-psl.eu/wp-content/uploads/2022/09/MecaniquePourChimistes-3.pdf	Jules Fillette		
Physique PSI/PSI*	Pascal Olive	Ellipses (2022)	
Mécanique : Fondement et applications	J.P. Pérez	Dunod (2014)	

Commentaires des années précédentes :

- **2017** : Les définitions d'un oscillateur et d'un portrait de phase sont attendues. La leçon doit présenter des systèmes comportant des non-linéarités,
- **2015** : L'intérêt de l'utilisation des portraits de phase doit ressortir de la leçon,
- **2013** : Les aspects non-linéaires doivent être abordés dans cette leçon sans

développement calculatoire excessif, en utilisant judicieusement la notion de portrait de phase. Une simulation numérique bien présentée peut enrichir cette leçon.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE 2ème année

Prérequis :

- Mécanique newtonienne : TMC, énergie mécanique,
- Electrocinétique : schéma électrique, loi des mailles, résistance, condensateur, inductance,
- calcul fonction de transfert du filtre de Wien
- équation du second ordre avec amortissement, facteur de qualité, régime apériodique, critique, pseudo-périodique

Déroulé détaillé de la leçon :

Introduction

Messages à faire passer : définition d'un portait de phase, portait de phase amorti/non-amorti, stabilité des points fixes, centres attracteurs.

Le notion de portait de phase est un outil très riche pour l'analyse de nombreux systèmes mécaniques, en particulier pour les oscillateurs. C'est que nous allons essayer de montrer dans cette leçon à travers quelques exemples. On va commencer par un exemple très simple.

I Oscillateurs harmoniques

On va s'intéresser à des systèmes mécaniques ou électrocinétiques dont on va dans un premier temps négliger les phénomènes de dissipation. On va commencer par prendre l'exemple très simple du pendule pesant.

I.1 Equation du mouvement d'un pendule pesant

Exemple de la physique : pendule simple à petites oscillations. On applique le théorème du moment cinétique appliqué à la masse m dans le référentiel terrestre

qu'on suppose galiléen :

$$\frac{d\mathbf{L}_O(M)}{dt} = mL^2\ddot{\theta}\hat{\mathbf{u}}_z = \mathbf{M}_O(\mathbf{P}) = -mgL\sin(\theta)\hat{\mathbf{u}}_z \quad (25.1)$$

On en déduit l'équation d'un oscillateur de pulsation propre $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{L}}$:

$$\ddot{\theta} + \omega_0^2 \sin(\theta) = 0 \quad (25.2)$$

Pour des petites oscillations ($\theta \ll 1 = 60^\circ$), on a :

$$\ddot{\theta} + \omega_0^2\theta = 0 \quad (25.3)$$

On trouve l'équation d'un oscillateur harmonique. Tout oscillateur harmonique est régi par la même équation. **Analyses** : masse accrochée à un ressort sans frottements, l'évolution temporelle de la charge d'un condensateur d'un circuit LC.

I.2 Portrait de phase

Voir BUP. **Définition** : pour un système dont l'évolution au cours du temps t est décrit par la fonction à valeurs réelles $x(t)$, on appelle trajectoire de phase une représentation géométrique cartésienne dans laquelle on reporte les positions au cours du temps t d'un point représentatif M d'abscisse x et d'ordonnée $\frac{dx}{dt}$.

Portrait de phase pour l'oscillateur harmonique :

$$\theta(t) = \theta_0 \cos(\omega_0 t) \quad (25.4)$$

$$\dot{\theta}(t) = -\theta_0 \omega_0 \sin(\omega_0 t) \quad (25.5)$$

$$\left(\frac{\dot{\theta}(t)}{\omega_0} \right)^2 + \theta(t)^2 = \theta_0^2 \quad (25.6)$$

Toutes les trajectoires dans le portait de phase $((\frac{\dot{\theta}(t)}{\omega_0}, \theta(t)))$ du pendule pesant (et en général d'un oscillateur harmonique dont la variable est $x(t)$) sont des cercles concentriques de rayon θ_0 qui dépendent des donc conditions initiales. A une CI correspond une trajectoire de phase.

Transition : Que se passe-t'il si on n'est plus dans l'approximation des petits angles ? On va voir qu'il y a des effets non linéaires qui apparaissent et que cela change le portait de phase du système.

II Effets non linéaires

II.1 Etude des effets non linéaires du pendule pesant

Voir Pérez p170 pour un calcul simple. Montrer que la période dépend de l'amplitude des oscillations.

Manip quantitative : mettre en évidence non linéarités. Faire une acquisition à grand angle. Parler pendant l'acquisition du programme bordaThomas.ipynb (ou alors faire simple et prendre les points à la main et puis Qutiplot, mais réfléchir aux incertitudes).

Il y a un enrichissement spectral (voir Duffait/livre d'expérience agreg).

II.2 Portait de phase de l'oscillateur anharmonique

Montrer sur Python la simulation puis sur slide si on trace pleins de portait de phase.

En vérifiant sur un document graphique le caractère cyclique d'une trajectoire de phase, on dispose d'un test du caractère périodique de l'évolution beaucoup plus précis que l'observation de l'allure de la représentation $x(t)$.

II.3 Approche énergétique (peut sauter)

Montrer qu'il y a conservation de l'énergie mécanique, toutes les trajectoires fermées ou cycliques dans un portait de phase expriment la conservation de l'énergie mécanique du système !

Transition : on a vu dans l'expérience qu'il y a avait un amortissement dû principalement aux frottements de l'air sur le pendule. On va modéliser cela dans la partie suivante et montrer le portrait de phase associé.

III Oscillateurs amortis et amplifié

III.1 Oscillateurs amortis

Donner l'équation. Montrer le portait de phase associé sous python ou sur slide (voir BUP). Définir un centre attracteur.

III.2 Oscillateurs entretenus : exemple du pont de Wien

Voir Pascal Olive p204.

Conclusion

Ouvrir sur les oscillateurs paramétriques ? Van der Pol, résistance négative, transition vers le chaos ?

Leçon 26

Cinématique relativiste. Expérience de Michelson et Morley

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Relativité	C. Semay	Dunod	
La relativité	A. Einstein	Payot	
Relativité et Invariance - Fondements et applications	J.-P. Pérez	Dunod	
Relativité Restreinte (exos)	Y. Simon	Armand Colin	
Mécanique 1 (Chap 1)	BFR	Dunod (1984)	
http://blog.ac-versailles.fr/profbcasanova/public/TS4_phychim/P8_muons-2014.pdf			
Mécanique 1 (Chap 15)	H. Gié et J.-P. Sarmant	Tec&Doc (1984)	

Commentaires des années précédentes :

- **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 œuvre 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.

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : Licence 3

Prérequis :

- référentiel galiléen, équations de la mécanique classique
- Equations de Maxwell,
- algèbre matriciel,
- interféromètre de Michelson

Introduction

I Emergence de la relativité restreinte

I.1 Retour sur le postulat de la mécanique classique

Voir Semay p8. **Postulat fondamental** : les lois de la mécanique sont identiques dans tous les référentiels galiléens (ou d'inertie, ou inertIELS).

Pour qu'on puisse dire des choses sur un même évènement physique se plaçant dans deux référentiels galiléens différents, il y a des règles qui doivent satisfaire ce postulat qu'on appelle transformations de galilée. Faire le schéma de deux référentiels en translation, puis si on prends les horloges des deux référentiels qui marquent l'instant 0 au moment où les axes des deux référentiels sont confondus :

$$x = x' + Vt' \quad (26.1)$$

$$y = y' \quad (26.2)$$

$$z = z' \quad (26.3)$$

$$t = t' \quad (26.4)$$

Ces relations s'inversent en remplaçant v par -v. Le temps est considéré comme absolu : il s'écoule de la même manière quelque soit les observateurs et leur état

de mouvement. Si deux évènements séparés par Δr dans l'espace et Δt dans le temps, sont simultanés ($t_1=t_2$), alors $\Delta r = \Delta r'$ donc Δr est un invariant.

On obtient la loi de composition des vitesses en dérivant (1) par rapport au temps (si $dt=dt'$) :

$$v_R = v_{R'} + V \quad (26.5)$$

Transition : De même, la lumière est une onde électromagnétique qui se déplace à la vitesse $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ et donc normalement doit satisfaire les règles de compositions des vitesses d'après la mécanique. On va voir justement que ce n'est pas vérifié expérimentalement.

I.2 Expérience de Michelson et Morlay

Voir Semay p10. Au XIXème siècle, les physiciens (Fresnel en particulier, savaient que les ondes devaient de propager dans un support matériel. Ils pensaient que les ondes lumineuses se propageaient dans un support appelé éther. Les équations de Maxwell ne sont donc que valables dans un référentiel de l'éther (voir démo p11-12 Pérez).

En 1881, Albert Michelson (français) et Edward Morley (américain) construisent un interféromètre pour mesurer la vitesse de l'éther. Ils vont supposer que la Terre est en mouvement de translation à la vitesse $V_{Terre/ether} = V = 30 \text{ km/s}$ et que la vitesse de la lumière est constante par rapport à l'éther. La mesure de la vitesse de la lumière dans le référentiel terrestre doit donner des valeurs différentes suivant l'orientation de la vitesse de la Terre par rapport à l'éther qu'on peut mesurer par interférométrie : construction de l'interféromètre de Michelson.

Faire schéma dans un bras puis dans l'autre sur slide. Faire les calculs (voir Semay p12-13).

Montrer les résultats de l'expérience de Michelson et Morley (Michelson et Morley, 1887). Voir site L. Le Guillou. Les traits en pointillés = 1/8 du déplacement théoriques attendu, la courbe du haut = observation à midi et la courbe du bas les observations pendant la nuit.

I.3 Postulat d'Einstein

Voir Semay p14.

1. Tous les référentiels galiléens sont équivalents, la formulation des lois de la physique doit être la même dans tous ces référentiels,
2. le module de la vitesse de la lumière dans le vide est indépendant de l'état du mouvement de la source,

Conséquence sur l'expérience de Michelson et Morley : si la vitesse de la lumière reste constante, $t_1 = t_3$ et $t_2 = t_4$ donc $\Delta T = 0$, les franges ne se décalent pas.

Transition : quelles sont les nouvelles transformations pour passer d'un référentiel à un autre si celles de galilée ne sont pas les bonnes ? C'est ce que nous allons voir dans la suite.

II Changement de référentiel relativiste

II.1 Evènements

Voir Semay p22.

II.2 Transformation de Lorentz

voir Pérez p21. Balancer directement la transformation de lorentz entre deux référentiels se translatant à la vitesse $V = V\mathbf{u}_x$:

$$ct = \gamma(ct' + \beta x') \quad (26.6)$$

$$x = \gamma(x' + \beta ct') \quad (26.7)$$

$$y = y' \quad (26.8)$$

$$z = z' \quad (26.9)$$

$$(26.10)$$

où on a introduit le facteur $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}}$. Tracer γ en fonction de v par exemple sur Python. Plusieurs remarques :

- on voit que le temps est relatif ! On définit le temps propre d'un objet le temps qui s'écoule dans le référentiel dans lequel cet objet est au repos,
- On peut retrouver dans la limite non relativiste $\beta \ll 1$ que $\gamma \sim 1$ qu'on retrouve bien les transformations de Galilée.

Transition : on a vu que Δr était un invariant pour les transfortions de Galilée, or $dt \neq dt'$ maintenant avec Einstein. Quel est donc le nouvel invariant pour les transfromations de Lorentz ?

II.3 Intervalle d'espace-temps

Voir Pérez p27-28 ou poly L. Le Guillou.

Faire une approche graphique voir Semay p34-35.

III Conséquences physiques

III.1 Dilatation du temps

Faire une approche [Expérience](#) : utilisation du programme Gum_C pour la détermination de γ des muons d'après l'expérience de Frish et Smith.

III.2 Contraction des longueurs

Leçon 27

Effet tunnel. Application à la radioactivité alpha.

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Tout-en-un PC/PC*	M.-N. Sanz	Dunod	
Leçons de Physique	Patrick Charmont	Dunod (2000)	
https://cahier-de-prepa.fr/pc*-poincare/download?id=1007			
https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/quantum-tunneling/latest/quantum-tunneling.html?simulation=quantum-tunneling	colorado.edu	Université du Colorado	
Les nouvelles microscopies	L. Aigouy	Belin	

Commentaires des années précédentes :

- **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,
- **2013-2011** : 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, ...).

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon :

Prérequis :

- Postulats de la mécanique quantique
- Particule dans un puit de potentiel harmonique

Introducion

Les lois de la mécanique quantique sont très différentes de la physique classique. Par exemple, du point de vue classique : si une particule voit un puit de potentiel, elle rebondit si elle n'a pas assez d'énergie. En revanche, la dualité onde-particule de la matière (introduite par de Broglie) va montrer quelques effets intéressants : l'aspect ondulatoire de la matière va permettre la transmission de la particule même si celle-ci possède une énergie inférieure au potentiel : c'est l'effet tunnel.

Décrire le modèle en disant ce qu'on

I Etats liés vs états de diffusion

I.1 Fonction d'onde et équation de Schrodinger

Probabilité : $|\psi(x, t)|^2 dx =$ probabilité de trouver la particule entre x et x+dx.
Interprétation possible que si $\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(x, t)|^2 dx = 1$.

Equation de Schrodinger : $i\hbar \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} + V(x)\psi(x, t)$

Equation linéaire, on peut choisir $\psi = \chi(x) \exp\left(-\frac{iE}{\hbar}t\right)$ avec le signe - dans l'exponentiel pour faire correspondre l'énergie de la particule.

Energie = valeur propre de H, c'est ce qu'on cherche à résoudre tout le temps en mécanique quantique.

- Si V confinement $V \sim x^2$, alors E est quantifié. on a des **états liés**
- Si V non confinement, E est continue et on a des **états de diffusion (ou libres)**

Etats de diffusion : ce sont les états qui vont nous intéresser pour l'effet tunnel.
Comment les interpréter ?

I.2 Courant de probabilité

Introduire le courant de probabilité et la densité de proba :

- $\rho(x, t) = |\psi(x, t)|^2$ densité de proba
- $\mathbf{j}(x, t) = \frac{\hbar}{2m} \left(\psi^* \frac{\partial \psi}{\partial x} - \left(\frac{\partial \psi^*}{\partial x} \right) \psi \right)$, courant de probabilité

Dans le cas d'une onde plane (non intégrable) :

- onde progressive : $\chi(x) = A \exp(ikx)$ et $\mathbf{j}(x, t) = \frac{\hbar k}{m} |A|^2 \mathbf{e}_x$ courant de proba dans le sens $+\mathbf{e}_x$
- onde régressive : $\chi(x) = A \exp(-ikx)$ et $\mathbf{j}(x, t) = \frac{\hbar k}{m} |A|^2 \mathbf{e}_x$ courant de proba dans le sens $-\mathbf{e}_x$

Schrödinger : $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0$ loi de conservation (démo p34 poly Jean Hare).

II Effet tunnel : transmission

II.1 Le puit carré modèle intégrable de la barrière de potentiel

Schéma du problème.

- $E > V_0$: état de diffusion, pas forcément super intéressant
- $E < V_0$: état de diffusion possible avec une certaine probabilité : c'est l'effet tunnel !

Calcul des fonctions d'ondes dans les zones 1, 2 et 3. Dire que B_3 s'annule car pas d'onde provenant de $+\infty$.

Donner les conditions aux limites $x = 0$ et $x = a$. On obtient 4 équations avec 5 inconnues.

II.2 Coefficients de réflexion et transmission

Cf Dunod p1252.



Ne pas faire la résolution complète, ça prend beaucoup trop de temps et ce n'est pas intéressant

On trouve R et T, on vérifie qu'on a bien $R+T=1$ (conservation de l'énergie).

Manip qualitative : montrer logiciel colorado qu'il y a transmission.

II.3 Approximation de la barrière épaisse

Trouver δ , l'interpréter. Garder l'analogie avec réflexion totale frustrée (voir Aigouy p140) pour les questions.

III Application à la radioactivité alpha

III.1 Désintégration alpha

Découverte de la radioactivité. Montrer carte de la stabilité des noyaux. Radioactivité α = noyaux lourds.

III.2 Modèle de Gamow

[Expérience](#) : Code python simulant Gamow (cf Alexandre).

III.3 Loi de Geiger-Nutall

Manip quanti/quali : faire regression $\log(T_{1/2}) = \frac{A}{\sqrt{E}} + B$ en utilisant un tableau de données préconstruit.

Conclusion

Deuxième partie

Leçons de chimie

Code couleur pour les manips :

Expérience déjà faite, sur laquelle je suis à l'aise
Retravailler un geste, l'interprétation de l'expérience
Manip à faire en priorité

Avancement préparation oraux Leçons Chimie

Titre de la leçon	Elément imposé	Expérience	Niveau
De la structure à la polarité d'une entité	logiciel de représentation molécule	0%	1ère générale - spécialité
Evolution d'un système chimique	Python, déterminer la compo d'un système	0%	1ère générale - spécialité, Python : cf agreg ou CAPES 2023
Dosage	Dosage par étalonnage (ex : sérum phy)	0%	1ère générale - spécialité
Synthèse, traitement, caractérisations p236	Filtration sous vide	Synthèse acide benzoïque	1ère générale - spécialité
Oxydants et réducteurs	Réaliser une pile	Pile Daniell	Term générale - spécialité
Chimie analytique quantitative et fiabilité	Titrage par conductimétrie	Titrage ions Cl dans sérum phy	Term générale - spécialité
Evolution spontanée d'un système	Déterminer Q_{final}	0%	Term générale - spécialité
Cinétique et catalyse	Mise en évidence d'un effet catalyseur	0%	Term générale - spécialité
Stratégies en synthèse organique	Protocole d'optimisation d'un rendement/vitesse	0%	Term générale - spécialité
Structure spatiale des molécules	Différencier 2 stéréoisomères	0%	1ère STL
Réactions acide-base en solution acqueuse	Préparer une solution tampon	0%	1ère STL
Solvants et solubilité	Etudier facteur influençant la solubilité	0%	1ère STL

Avancement préparation oraux Leçons Chimie

Titre de la leçon	Elément imposé	Expérience	Niveau
Synthèse, purification, contrôle pureté liquide organique	CCM	0%	1ère SPCL
Réactivité des alcools	Recristallisation	Aspirine	1ère SPCL
Réactions de synthèse, sites électrophiles, nucléophiles, formalisme flèches courbes	Montage à reflux	0%	1ère SPCL
Stéréochimie de configuration, p205	Différencier 2 stéréoisomères	Hydro-halogénéation régiosélective	Terminale SPCL
Distillation et diagrammes binaires, p197	Distillation	Distillation eau-éthanol	Terminale SPCL
Techniques spectroscopiques	Déterminer C d'après une courbe d'étalonnage	Dosage bleu brillant dans le curaçao	Terminale SPCL
Conductivité	Titrage par précipitation	Déterminer concentration Cl dans le sérum phy	Terminale SPCL, revoir plan pour caler les expériences
Solubilité	Extraire sélectivement les ions d'un mélange	Extraction sélective des ions fer dans une solution de nitrate de fer et de sulfate de cuivre (Mesplède p193)	Terminale SPCL
Oxydoréduction	Titrage dont la réaction support est une oxydo-reduction	Titrage des ions hypochlorite contenus dans le Dakin/eau de Javel	Terminale SPCL
Réactivité des dérivés d'acide	Montage Dean-Stark	Synthèse arôme de banane	Terminale SPCL
Electrolyse, électrosynthèse	Réaliser une électrolyse à anode soluble	Elec à anode soluble- Florence Porteu-de-Buchère - Dunod p190	Terminale SPCL

Avancement préparation oraux Leçons Chimie

Titre de la leçon	Elément imposé	Expérience	Niveau
Energie chimique - exemple des combustions	Estimer pouvoir calorifique d'une combustion	Voir Nathan ST2S	1ère/terminale STI2D
Oxydoréduction p248	Déterminer la capacité d'un accumulateur	Accumulateur au plomb	1ère/terminale STI2D
Molécules d'intérêt biologique	Différencier aldéhyde/cétone	Voir Nathan ST2S	1ère ST2S
Gestion des risques au laboratoire de chimie p244	Mettre en œuvre un protocole de neutralisation	Neutralisation acide	1ère ST2S
Biomolécules et énergie p240	Réaliser l'hydrolyse d'un glucide complexe	Voir Nathan ST2S	1ère ST2S
L'eau, propriétés physiques et chimiques	Réaction une extraction liquide/liquide	0%	1ère ST2S
Chimie et alimentation	Teneur en vitamine C d'un aliment/médicament	0%	Terminale ST2S
Contrôle qualité de l'eau et de l'air	Réaliser un dosage conductimétrique	Dosage des ions SO_4^{2-} dans la Contrex	Terminale ST2S

Transformations chimiques en solution acqueuse	Déterminer K_{eq} d'une réaction (A/B, précipitation, redox)	0%	MPSI
Acides et bases	Déterminer K_a	0%	MPSI
Solvants	Déterminer constante de partage	0%	MPSI
Structure et prop des solides	Utiliser avogadro ou vesta et déterminer des paramètres géométriques	0%	MPSI
Cinétique homogène	Déterminer E_a	hydrolyse du chlorure de tertiobutyle suivie par pH-métrie - F. Porteu de Buchère p40	MPSI
Diagrammes E-pH p232	Mettre en œuvre une médiamutation	0%	MPSI
Liaisons chimiques	Utiliser Vesta ou avogadro	0%	MPSI

Avancement préparation oraux Leçons Chimie

Titre de la leçon	Elément imposé	Expérience	Niveau
Utilisation 1er principe pour la détermination de grandeurs physico-chimiques	Déterminer $\Delta_r H_{reaction}$	pas fait - F. Porteu p75	PSI
Optimisation d'un procédé chimique	Mettre en évidence influence T ou P ou catalyseur sur une réaction	0%	PSI
Corrosion humide des métaux	Protection contre la corrosion (clou+gel agar-agar)	Passivation du fer-Cachau Redox	PSI
Générateurs électrochimiques	Montrer influence de facteurs sur e_{vide} d'une pile	0%	PSI
Conversion d'énergie électrique en énergie chimique	Déterminer $\eta_{faradique}$ d'un électrolyseur	0%	PSI
Cinétique électro-chimique	Tracer courbe i-E	0%	PSI
Application 2nd principe à une transfo chimique	Déterminer une constante d'équilibre thermo	0%	PSI
Diagramme E-pH	Réaliser un procédé industriel à l'échelle du labo	0%	TSI 2
Déplacement de l'équilibre chimique	Utiliser un bain thermostaté	0%	TSI 2

Idées en vracs

- Pour l'utilisation de la trompe à eau ou de la pompe à vide : briser le vide d'abord, couper l'eau ou l'alimentation de la pompe après
- Site de l'INRS pour les fiches toxicologiques des composés chimiques :
<https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox.html>
- https://chem-file.sourceforge.net/data/formula_index_fr.html : site pour les représentations de molécules sur AVOGADRO

Leçon 28

L'eau, propriétés physiques et chimiques

Bibliographie

Titre	Auteur(s)	Editeur (année)	ISBN
BUP n°790			

Plan détaillé

Niveau : 1er ST2S

Introduction pédagogique

Prérequis

- Barycentre
- Formules développées et semi-développées

Contexte : Place de la leçon : milieu d'année.

Notions importantes

- Constante de solubilité
- sens de l'évolution

- influence de la solubilité (T, pH, etc...)
- protocole

Objectifs

- prédire la précipitation, dissolution
- déterminer la solubilité et prévoir son évolution

Difficultés

- Appréhender le caractère polaire/apolaire liée à la géométrie
- distinctions entre liaisons covalente et hydrogène
- miscibilité, solubilité

Pour y remédier, activité préliminaire pour manipuler les grandeurs

Introduction

Dissolution courante dans la vie de tous les jours.

Question :

Manipulation qualitative :

I Electronégativité

I.1 Liaison polarisée

Def électronégativité : Grandeur sans dimension caractérisant la capacité qu'à un atome engagé dans une liaison à attirer les électrons vers lui.

Tableau périodique : $\chi(O) > \chi(H)$.

Def charge partielle : δ^\pm

Def polarisation d'une liaison chimique : si $\Delta\chi = 0$: liaison apolaire. si $\Delta\chi \neq 0$: liaison polaire.

I.2 La liaison hydrogène

Def liaison hydrogène : liaison de type attractive entre deux entités polaires. $E_{liaison-H} = qqk\text{J/mol}$. C'est une liaison électrostatique attractive entre deux charges partielles de signes opposés. Permet d'expliquer, en partie, les différences de température d'ébullition entre des corps purs.

II Propriétés chimiques de l'eau

Manipulation : dépollution de l'eau : mélange d'eau et de I_2 pour faire passer I_2 de l'eau au cyclohexane. Puis extraction liquide-liquide avec une ampoule à décanter.

Conclusion

Leçon 29

Contrôle qualité de l'eau et de l'air

Bibliographie

Titre	Auteur(s)	Editeur (année)	ISBN

Plan détaillé

Niveau : Terminale ST2S

Introduction pédagogique

Prérequis

—

Contexte :

Notions importantes

—

Objectifs

—

Difficultés

Introduction

Problématiques environnementales : problème sur la qualité de l'air (pollution dans les grandes villes par exemple) et de l'eau (algues vertes en Bretagne par exemple). On doit avoir des moyens de contrôle de la qualité.

I Contrôle qualité de l'eau

I.1 Intérêt du contrôle de qualité

Slide critère qualité de l'eau : microbiologique, organoleptique, limite de potabilité, limite de qualité.

I.2 Solubilité des ions et de la conductivité

Def dissolution et conductivité + manip qualitative pour la conductivité avec LED.

Conductivité proportionnelle à la concentration des ions : Manip qualitative étalonnage solution ions chlorure.

I.3 Dosage conductimétrique pour déterminer la teneur en sulfate

Manip quantitative : mesure de la quantité de SO_4^{2-} dans la Contrex. Réaction de titrage :



Avec $C_0(Ba^{2+}) = 5 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$. Tableau d'avancement avant et après équivalence.

II Contrôle de la qualité de l'air

II.1 Composition de l'air

Slide composition de l'air.

Déf fraction molaire.

II.2 Combustion d'une bougie

Manip qualitative : allumer une bougie, la mettre sur un cristallisoir rempli d'eau, mettre une éprouvette dessus pour la piéger dans l'eau, voir que le niveau d'eau augmente au fur et à mesure que le diogène est consommé et que le dioxyde de carbone se dissout dans l'eau. On a une mesure de la quantité de CO₂??

Remarques intéressantes

- Si on boit de l'eau déminéralisée, pression osmotique qui va être plus forte de la cellule vers l'eau car la membrane cytoplasmique est poreuse : explosion de la cellule
- Si on boit de l'eau hyper salée, pression osmotique de l'eau vers la cellule : compression de la cellule
- la dureté de l'eau s'exprime en ppm (ou mg/L) de CaCO₃ ou en degrés français (symbole °f ou °fH) en France et en Suisse. Un degré français correspond à 10ppm de calcaire représentant 10 – 4molL⁻¹ de calcium, soit 4 mg/L de Ca²⁺, ou encore 2,4 mg de magnésium par litre d'eau (cf Wikipédia)

Leçon 30

Solubilité

Bibliographie

Titre	Auteur(s)	Editeur (année)	ISBN
100 manipulations de chimie (p193)	Jacques Mesplède, Jérôme Randon	Bréal (2004)	
http://je-plante-mon-agreg.com/Documents/Chimie_exp%C3%A9rimentale-Listes_TP_chimie.pdf			
https://spcl.ac-montpellier.fr/moodle/pluginfile.php/11573/mod_resource/content/2/Chapitre%20-%20Solubilite%20-%20%20Fiche%20de%20synthese.pdf			
http://leonardvinci.e-monsite.com/medias/files/02.solubilite.pdf			

Plan détaillé

Niveau : Tle STL - SPCL

Introduction pédagogique

Prérequis

- pH, pH-métrie
- quantité de matière, masse volumique, concentrations

Contexte : Place de la leçon : début d'année.

Notions importantes

- Constante de solubilité
- prédire l'évolution
- influence de la solubilité (T, pH, etc...)

Objectifs

- prédire la précipitation, dissolution
- déterminer la solubilité et prévoir son évolution

Difficultés

- Difficultés mathématiques (unités, etc...)
- Lien entre constante d'équilibre et pH

Pour y remédier, activité préliminaire pour manipuler les grandeurs

Introduction

Dissolution courante dans la vie de tous les jours. Ex : sucre dans le café.

Manipulation qualitative : Exp qualitative : mettre du sel dans l'eau. Quelle est la quantité max de sel qu'on peut mettre dans l'eau ?

I Solubilité et produit de solubilité

I.1 Solubilité

Def solubilité : Notée s , quantité de matière/masse maximale d'une espèce que l'on peut dissoudre dans un litre de solvant (en mol.L^{-1} ou g.L^{-1})
ex : $s(\text{NaCl})=358.5\text{g.L}^{-1}$ à 20°C .

I.2 Produit de solubilité

Pour la réaction : $\text{NaCl(s)} = \text{Na}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$

$$K_s = \frac{[\text{Na}^+]_{eq}[\text{Cl}^-]_{eq}}{(C^0)^2} \quad (30.1)$$

Tableau d'avancement : $s = \sqrt{K_s}$

II Quotient de réaction

$$Q_r = \frac{[\text{Na}^+]_{eq}[\text{Cl}^-]_{eq}}{(C^0)^2} \quad (30.2)$$

- $Q_r < K_s$: sens direct : dissolution
- $Q_r = K_s$: équilibre
- $Q_r > K_s$: sens indirect : précipitation

III Facteurs influençant sur la solubilité

III.1 Le pH

Rappel : $pH = -\log([\text{H}_3\text{O}^+])$

Le pH influe sur la solubilité s : $\text{Fe(OH)}_3(\text{s}) = \text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{HO}^-(\text{aq})$.

$$K_s = \frac{[\text{Fe}^{3+}]_{eq}[\text{HO}^-]_{eq}^3}{(C^0)^4} \quad (30.3)$$

Contexte : application industrielle pour séparer les ions métalliques d'un minéral par exemple.

Manipulation principale : On va mélanger deux solutions à 1M, une solution de sulfate de cuivre (de couleur bleue) et une solution de nitrate de fer (de couleur orange).

On va faire précipiter d'abord les ions fer Fe^{2+} avec une solution de soude à 1M puis filtrer le précipité sur fritté.

Les réactions possibles sont :

- $\text{Fe(OH)}_2(\text{s}) = \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{HO}^-(\text{aq})$ possible à $pH \sim 2$
- $\text{Cu(OH)}_2(\text{s}) = \text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{HO}^-(\text{aq})$ possible à $pH \sim 4.8$

C'est pour ça qu'on utilise un pH-mètre pour contrôler qu'on ne dépasse pas un pH d'environ 4.

La manip fonctionne bien, on voit que la couleur de la solution redevient bleue après filtrage du précipité de $\text{Fe(OH)}_2(\text{s})$.

III.2 Température

En général, la solubilité augmente avec la température.

Attention : Il y a des exceptions. s peut diminuer avec la température (ex : calcaire dans la bouilloire).

IV Conclusion

Applications : dépollution de l'eau, séparation des métaux, décalcification en milieu acide.

Questions posées

- Slide intro, je suis d'accord sur la position de leçon, objectifs : première capacité expérimentale du BO pas mentionnée ? **Non, mais je la travaillerai en TP en demi-groupe.** Quelle technique peut-on utiliser pour extraire le solide ? **Extraction liquide-liquide.**
- Est-ce que l'appareil de l'extraction a déjà été vu ? **Je ne me rappelle plus s'ils l'ont vu l'année dernière, mais je ferai une séance d'intro de la verrerie en début d'année. Donc à mettre en prérequis.**
- Le point à $1mL$ dévie de la droite, pourquoi ? **Cela peut être dû au fait qu'à ce volume, on n'est pas forcément dans le régime linéaire de la loi de Kohlrausch.**

- Vous donner comme exemple le titrage des ions nitrate. Comment proposez-vous d'en déterminer la concentration ? **En réalisant le même titrage que pour les ions chlorure.** Peut-on dans ce cas déterminer séparément la concentration des 2 analytes (NO_3^- et Cl^-) ? **Non.**
- Tu n'as pas du tout parlé de quantité de matière, concentration, etc... ? **J'ai oublié de faire un calcul de la solubilité dans la leçon...**
- Pas de problème de vocabulaire sur les difficultés ? C'est quoi un précipité si tu devais le présenter à tes élèves ? **Un solide qui refuse de se dissoudre dans un solvant**
- Dans ton expérience introductory, est-ce qu'il reste du sel ? **Quasiment pas, mais j'aurais du utiliser un autre solide coloré pour que ça soit visible (PbI_2) par exemple.**
- Dans la définition de la solubilité, tu as oublié la température. **Oui...**
- Qu'est-ce qu'il se passe à K_s ? **Il y a coexistence du précipité et des ions en solutions.**
- Différence entre un état final et un état d'équilibre ? **Oui, il y a une différence.**
- Peut-on définir K_s pour d'autres composés que ioniques ? **Non, on peut avoir dissolution d'un gaz dans l'eau par exemple.** Que se passe-t'il si P augmente ? **s augmente**
- D'autres moyen pour faire varier la solubilité ? **Effet d'ions communs.**
- Comment as-tu défini la solution saturée ? **Quand on a ajouté s ou plus de solide dans le solvant.**
- Lien entre pH et concentration en HO^- ? **$[\text{HO}^-] = 10^{-14-pH}$**
- Comment on fait en pratique pour les minerais ? **Lixiviation, on se place à un pH super acide et on broit les minerais.**
- Pour la manip, tu voulais faire qualitatif ou quantitatif ? **Qualitatif.** Comment tu aurais fait pour la rendre quantitatif ? Peux-tu faire le calcul du pH d'apparition de $\text{Fe(OH)}_2(\text{s})$? **$[\text{HO}^-] = (\frac{K_s}{[\text{Fe}^{2+}]})^{1/3}$. Avec $[\text{Fe}^{2+}] = 0.25 \text{ mol.L}^{-1}$ environ (rajout d'environ le double d'eau du mélange de solution de 10mL de chaque réactif. On trouve $pH = 1,87$. Il aurait fallu faire ce calcul qui est abordable en terminale. Cela aurait permis de mieux comprendre pourquoi on ne devait pas dépasser ce pH.**
- Si tu devais refaire faire la manip aux étudiants, que dirais-tu niveau sécurité pour la fiole à vide ? **Il faut l'attacher avec une pince 3 doigts et une potence.**

- Pourquoi dans le cas du calcaire c'est une exception? Si on augmente la température, la solubilité du CO₂ dans l'eau diminue ce qui augmente le pH.
- Que proposez-vous en séance de travaux pratiques? Le titrage du serum physiologique, c'est pédagogique car c'est un produit du quotidien.

Commentaires

Plan très bien, explications sont claires et pédagogiques. Choix de la manip impecc. Il manque le quantitatif dans la manip. Gestes pour la manip très bien.

Expérience 1

Titre : Illustration solubilité du sel dans l'eau.

Référence complète :

But de la manip : En faible quantité ajouté dans l'eau, le sel se dissous complètement. Au-delà d'une certaine concentration de sel, il reste du précipité.

Commentaire éventuel : On peut faire la manip avec une espèce coloré comme PbI₂ pour que ça soit plus visuel.

Durée de la manip : 2'

Expérience 2

Titre : Extraction sélective des ions fer dans une solution de nitrate de fer et de sulfate de cuivre.

Référence complète : 100 manipulations de chimie, J. Mesplède et J. Randon, p193

Équation chimique et but de la manip : Fe(OH)₂(s) = Fe²⁺(aq) + 2HO⁻(aq)

Phase présentée au jury : Précipitation des ions fer en maintenant le pH en-dessous de 4. Puis filtration sur fritté.

Commentaire éventuel : Prévoir un fritté très fin.

Durée de la manip : 10'

Compétence « Autour des valeurs de la République et des thématiques relevant de la laïcité et de la citoyenneté »

Question posée : En quoi la démarche scientifique fais de nous des bons citoyens ?

Réponse proposée : La démarche scientifique c'est : observer de l'environnement, vérifier, raisonner, garder confiance en soi et avoir foi en les autres, être optimiste. Avoir un esprit critique sur des sujets de société. Beaucoup de complotisme de nos jours, la démarche scientifique permet de démonter cela.

Commentaire du correcteur :

Champ libre pour le correcteur

Leçon 31

Distillation

Bibliographie

Titre	Auteur(s)	Editeur (année)	ISBN
Tout-en-un Chimie PC/PC*	B. Fosset, J-B. Baudin	Dunod (2022)	
http://vle-calc.com/	Site sympa pour les diagrammes		
https://spcl.ac-montpellier.fr/moodle/course/view.php?id=61&section=7	Académie de Montpellier	Eduscol	

Rappels de définitions, concepts à aborder lors de la leçon :

Rappels : cf le BO de la spécialité SPCL de STL.

1. Pouvez-vous rappelez les difficultés associées à cette leçon ? **Lecture et compréhension de diagramme binaire, lien avec la distillation, courbe d'analyse thermique (mélange binaire), nombreuses définitions avec lesquelles on joue (fraction molaire/massique/titre/masse molaire, etc...), verrerie associée au montage.** Y-a-t'il une difficulté en terme de vocabulaire ? **Clairement, on doit insister sur les définitions et les différents noms de la verrerie spécifique à la distillation** Comment s'appelle le ballon ? **Le ballon est un bon exemple pour insister sur les définitions. On le nomme "bouilleur". C'est un terme qu'on utilise dans d'autres situations ? Dans les chaufferies, sert à faire bouillir le fluide chauffant. Dans l'industrie du sel, présent dans le processus de déssalement.**

2. L'hydrodistillation est-elle au programme de terminale STL-SPCL ? **Oui, dans le thème « Chimie et développement durable ».**
3. Diagramme binaire, notion théorique ou expérimentale ? **C'est une notion théorique à connotation fortement expérimentale car très utile pour déterminer les fractions massiques d'un mélange. Notion théorique car c'est applicable en théorique à tous les mélanges binaires et relié aux concepts thermodynamique (capacité thermique, température de changement d'état donc enthalpie de changement d'état, équation d'état, principes de la thermodynamique, etc...).**

Avis sur le plan proposé, choix des exemples et des expériences :

Plan :

I Mélanges binaires homogènes

Pour étudier les mélanges binaires homogènes, on a avoir besoin d'un certains nombre de définitions qui seront importantes dans tout le déroulé de la leçon.

I.1 Mélange binaire

Définition d'un mélange homogène : mélange dont on ne peut distinguer à l'œil nu ses différents constituants. Définition d'un corps pur : matière qui ne comporte qu'une espèce chimique.

I.2 Fraction molaire

Définition fraction molaire d'un mélange A+B : la fraction molaire d'un corps A est : $x_A = \frac{n_A}{n_A+n_B}$, avec n_i la quantité de matière du corps i

I.3 Fraction massique

Définition fraction massique d'un mélange A+B : la fraction massique d'un corps A est : $w_A = \frac{m_A}{m_A+m_B}$, avec m_i la masse du corps i .

II Diagrammes binaires

II.1 Diagramme liquide-vapeur isobare

Présentation et explication des graphes $T=f(x \text{ ou } w)$: on montre la courbe de rosée et la courbe d'ébullition à une pression donnée. On décrit l'exemple particulier du diagramme eau/éthanol.

II.2 Courbes d'analyse thermique

Tracé des graphes $T(t)$ pour un corps pur : on part de la phase liquide, on arrive à la température d'ébullition qui marque un pallier jusqu'à ce que la dernière goutte de liquide disparaît puis elle réaugmente dans la phase gazeuse.

Pour un mélange binaire homogène, le plateau de température n'est pas constant car les corps A et B du mélange ont des températures de fusion différentes.

Définition de corps volatil : on appelle de volatil la capacité d'un solide ou d'un liquide à se vaporiser facilement. On va jouer sur les différences de volatilité entre les corps d'un mélange homogène pour réaliser une distillation par exemple.

II.3 Azéotrope

Definition azéotrope : mélange présentant une composition particulière pour lequel il se comporte comme un corps pur (phases L et V à l'équilibre ont la même composition). On le montre explicitement sur le diagramme binaire.

II.4 Exploitation

On prend un exemple en se plaçant à une certaine fraction molaire (ou massique) d'un mélange à une température où le mélange est liquide. On fait la lecture des températures d'ébullition et de condensation. On parle de la composition des premières vapeurs (ou des premières gouttes). On rappelle les propriétés de volatilité des corps, et on fait un exemple sur une seule recondensation en présentant la nature du distillat obtenu.

III Application à la distillation

III.1 Distillation simple

Sur slide : rappel du montage, lecture sur le diagramme. Ce montage a déjà été vu dans les cours de première et on va voir un nouveau montage qui est celui de la distillation fractionnée.

III.2 Distillation fractionnée

Sur slide et sur la paillasse : rappel montage, lecture sur le diagramme. On insiste sur les noms de la verrerie : ballon à fond rond, colonne de Vigreux, condenseur, erlenmeyer.

Expérience :

On procède à l'expérience de distillation fractionnée sur un mélange eau/éthanol en pesant au préalable les masses d'eau et d'éthanol pour voir où on se place dans le diagramme binaire. On fait chauffer le mélange et on attend de voir les premières gouttes dans le distillat.

La réaction est assez rapide suivant la hauteur de la colonne de Vigreux (10min en préparation, 5min au cours de la leçon, ça dépend aussi de la composition du mélange au départ). Il faut faire attention à ce que la température du thermomètre placé au niveau du coude {colonne de Vigreux - condenseur} ne dépasse pas la température de l'azéotrope, sinon cela veut dire qu'on commence à faire recondenser de l'eau dans le distillat ce qui dégrade la distillation.

On détermine de la fraction massique à l'aide d'une courbe d'étallonnage masse volumique vs titre alcoolémique. Puis on détermine le rendement donné par :
$$\eta = \frac{m_{\text{eth, distillat}}}{m_{\text{eth, initial}}}.$$

Conclusion

Ouverture sur l'application de la distillation dans la pétrochimie : on montre le schéma du distillat pour le pétrole (gaz, fioul, pétrole brut etc...) en expliquant que ces différentes phases correspondent au raffinement (pourcentage de distillation) du pétrole brut.

Avis : Bonne leçon globalement, attention à la trace écrite et les sous-parties vides.

Bien d'avoir choisi un système réel, mais garder eau+éthanol pas « A+B ». Bien pour les prérequis mais pas toujours clair sur ce qui est connu. Le dire dans l'intro péda.

Utilisation diagrammes binaires solide-liquide : eau + sel pour abaisser le point de fusion sur les routes.

Attention ne pas être trop vague sur les réponses, essayer de bien détailler.

L'olive : fond rond = ballon, fond plat = bécher

Montage à bien expliquer avec un schéma en direct ou un montage en direct.

Attention au vocabulaire (bouilleur, distillat, etc...).

Difficulté, la lecture des graphiques peut ne pas être intuitif.

Calorifuger la colonne de vigreux pour augmenter la vitesse de distillation.

Incertitudes pas adaptées car faits sur la calculatrice et pas sur tableau.

A l'aise à l'oral, bien pour les couleurs, attention dans le langage « j'ai 30s donc je me dépêche », être naturel pour être bien en maîtrise (même si dans la tête c'est pas du tout ça).

Remarques sur des points spécifiques de la leçon :

- Comment faire le lien entre diagramme binaire isobare et isotherme ? Comment à partir d'un diagramme à un fuseau vous pouvez tracer le diagramme binaire correspondant ? **Similaire mais avec courbe d'ébullition en haut et courbe de rosée en bas.**
- Titre en alcool, fraction molaire/massique, comment vous les reliez ? Comment l'expliquer aux étudiants ? **On peut partir des définitions, par exemple le titre massique $w_A = \frac{m_A}{m_A+m_B}$ et utiliser la relation $m_A = n_A \times M_A$ avec n_A la quantité de matière et M_A la masse molaire du corps A. Ensuite en multipliant en haut en en bas de la fraction par n_A+n_B , on voit apparaître les fractions molaires $x_{A/B} = \frac{n_A}{n_A+n_B}$ ce qui donne $w_A = \frac{x_A M_A}{x_A M_A + x_B M_B}$. Pour le titre massique, on fait la même chose en remplaçant $m_A = \rho_A V_A$.**
- En industrie, quel est l'ordre de grandeur des rendements ? Pour l'éthanol ? **En général, ils sont optimisés et donc très bons. L'ordre de grandeur pour l'éthanol est de l'ordre de celui du point azéotrope soit 96.5% à $P = 1$ bar pour la distillation fractionnée. On peut aller plus loin en pureté ? Oui, mais il faut introduire un troisième corps (le benzène pour l'éthanol) et utiliser les diagrammes ternaires. Le rendement est bien plus élevé (l'éthanol anhydre, utilisé pour des réactions très sensibles à l'eau, contient de l'eau à 50 ppm**

selon Wikipédia).

4. Quelle différence entre l'hydro-distillation et l'entraînement à la vapeur ? En terme de montage expérimental ? L'entraînement à la vapeur d'eau et l'hydrodistillation sont des procédés d'extraction ou de séparation de certaines substances organiques de l'eau. Ces deux termes n'ont pas la même signification. "Hydrodistillation" désigne la distillation d'un mélange hétérogène d'eau et d'un liquide organique. L'hydrodistillation est beaucoup utilisé en parfumerie et utilise la décomposition des réactifs (molécules odorantes d'un composé organique libérées après décomposition de ce composé sous l'effet de la chaleur). "L'entraînement à la vapeur" est applicable aux composés peu ou pas solubles dans l'eau, dotés d'une tension de vapeur assez importante vers les 100 °C. L'avantage de cette technique réside en l'abaissement de la température de distillation les composés sont donc entraînés à des températures beaucoup plus basses que leur température d'ébullition, ce qui évite leur décomposition.
5. Pourquoi cette leçon est dans le cadre du programme "Systèmes et Procédés" ? Le thème « Systèmes et procédés » a pour objectif d'étudier des systèmes réels en analysant les flux d'information, de matière et d'énergie. Il comporte un sous-thème "transport et transformation des flux de matière" dont l'étude est un élément important pour l'analyse et la compréhension des procédés physico-chimiques comme ceux liés à la distillation
6. C'est quoi la physique derrière les diagrammes binaires ? Comment obtenir l'équation des courbes rosée/ébullition ? cf. cours de thermochimie.
7. Liquide/vapeur seuls diagrammes ? Diagrammes solide-liquide. Avec solides/liquides que pouvez-vous expliquer ? Salage des routes, mélange eau+sel a une température de fusion plus basse que celle de l'eau pure.

Discussion sur les manipulations présentées au cours du montage(objectifs de l'expérience, phases de manipulations intéressantes, difficultés théoriques et techniques) :

1. Vous n'avez pas utilisé de gants ? Quelles sont les précautions à prendre pour votre montage ? Non, l'éthanol n'est pas dangereux, on en boit (avec modération) et on l'utilise couramment avec le gel hydroalcoolique par exemple. En revanche il est très inflammable donc il faut l'éloigner des sources de chaleurs.
2. Préciser la position du thermomètre sur le distillat ? Il faut qu'il s situe

au niveau du coude entre la partie colonne de vigreux et le réfrigérant. On veut connaître la température de la phase vapeur qui sort de la colonne de vigreux et vérifier qu'elle ne dépasse pas la température de l'azéotrope, sinon on commence à évaporer une phase pure en la phase qu'on ne souhaite pas voir présent dans le distillat.

3. Pourquoi avez-vous été surprise sur la rapidité de la distillation ? Si on attend encore plus, qu'est-ce qu'il se passe ? C'était un peu plus rapide que pendant la préparation. Ca peut être un peu critique si on attend trop car on va recondenser l'eau dans le distillat et modifier la pureté de l'éthanol distillé.
4. Au niveau sécurité ? Quels conseils aux étudiants pour remplir le chauffe ballon ? On fera attention à la fragilité de la verrerie. On fera attention à ce que l'évaporation ne soit pas complète car on peut endommager les équipements et la verrerie. C'est aussi pour cela qu'on utilise des chariots élévateurs pour empêcher le contact bouilleur-chauffage rapidement si besoin.
5. Que faut-il utiliser pour homogénéiser la solution dans votre cas ? Que olive avec la forme adaptée (bombée) pour le ballon. Que feraient les étudiants ? Probablement ils ne se poseraient pas la question sur la forme de l'olive à choisir. L'olive c'est le seul outil ? Oui ? C'est quoi une bonne agitation ? Une agitation qui homogénéise bien la solution et que ne crée pas d'éclaboussures.
6. Le thermomètre servait à quoi dans le montage ? A vérifier que la température ne dépassait pas celle du point azéotrope du diagramme binaire eau/éthanol
7. Si la distillation est trop lente, comment faire pour l'accélérer ? On peut calorifuger les parois de la colonne.
8. Si on revient aux incertitudes sur les masses, est-elle représentative de l'incertitude de l'expérience ? Non, l'incertitude va surtout porter sur les pertes de matières lors des différentes manipulations (transfert d'un récipient à un autre, etc.). Ces incertitudes ne peuvent être qu'estimer à vue d'oeil.
9. Quel est l'intérêt de présenter les incertitudes ? Elle est intéressante pour faire comprendre le sens physique qu'il y a derrière, voir la propagation des erreurs (incertitudes sur une fraction, une somme) et pour comparer aux valeurs tabulées dans la littérature (fraction massique de l'azéotrope).

Propositions de manipulations –Bibliographie :

1. Quel TP vous feriez faire aux étudiants dans cette leçon ? Quels composés vous distilleriez dans ce cours-là ? La même expérience que réalisée ici (distillation d'un mélange eau/éthanol) est intéressante. On peut aussi regarder l'effet de la taille de la colonne de vigreux et aussi faire la comparaison distillation fractionnée/distillation simple.
2. Si vous avez le choix, vous aborderiez ces notions comme vous l'avez fait ou autrement ? Une analyse documentaire peut être pertinente : proposer des exemples de distillation utilisant les diagrammes binaires en industrie, faire réfléchir sur des montages possibles. Cela permet de se familiariser avec le vocabulaire.. Où prendriez-vous les docs pour une analyse documentaire ? Internet, Dunod PC, liens vidéos ludiques, simulation ou animation. Quelles sont les sources que vous avez utilisées sur les diagrammes binaires ? Que pouvez-vous faire avec VLE-calc ? Tracer des diagrammes binaires liquide-vapeur, obtenir les infos sur les azéotropes, etc. Pas de références papier ? Dunod PC, techniques expérimentales en chimie, principalement internet.

Autour des valeurs de la République et des thématiques relevant de la laïcité et de la citoyenneté :

Quelle est la place de l'humour sur la copie et à l'oral sur la relation élève professeur ?

L'humour peut être utilisé mais il faut faire attention à ses limites. L'humour à outrance peut décrédibiliser l'autorité et se retourner contre l'enseignant, surtout en début d'année. L'humour pour pointer une difficulté d'un élève en classe ou sur la copie peut être très mal pris par l'élève, à voir évidemment avec son caractère en cours d'année. On ne peut pas rire de tout avec les élèves en classe, mais on peut faire de l'humour avec un élève en particulier à condition de connaître son caractère et de respecter des limites de décence. Un exemple humouristique (par exemple montrer une image des Duponts dans Tintin qui font des bonds sur la lune main dans la main avec des cheveux colorés pour illustrer la gravitation) peut être attrayant et source de motivation/d'intérêt pour l'élève. L'humour est aussi une question de sujets.

Leçon 32

Stéréochimie de configuration

Bibliographie

Titre	Auteur(s)	Editeur (année)	ISBN
http://ressources-stl.fr/wp-content/uploads/2020/08/Structure-spatiale-des-especes-chimiques.pdf	Ressource STL		
https://truejulosdu13.github.io/assets/organic_chemistry_lessons/Cours2.pdf	Jules Schleinitz		
https://spcl.ac-montpellier.fr/moodle/course/view.php?id=61	Académie de Montpellier	Chapitre 9	
Compte-rendu leçon Thibaut LC03			

Plan détaillé

Niveau : Tle STL - SPCL

Introduction pédagogique

Prérequis

- représentation de Lewis, Cram
- formalismes des flèches courbes

Contexte : Place de la leçon : dernier cours de chimie.s

Notions importantes

- Stéréoisomérie (enantiomère, diastéréoisomère)
- stabilité des carbocations,
- polarimétrie de Laurent

Objectifs

- géométrie carbocation
- déterminer excès énantiomérique par la loi de Biot
- règles CIP

Difficultés

- vocabulaire,
- représentation dans l'espace,
- manipuler la loi de Biot

Introduction

On a vu les différents types de réactions à l'aide de mécanismes réactionnels, on va s'intéresser ici à la géométrie des produits obtenus. Ceci est particulièrement important car scandale sanitaire https://fr.wikipedia.org/wiki/Thalidomide#M%C3%A9canismes_de_l'_effet_t%C3%A9ratog%C3%A8ne.

Expérience : https://spcl.ac-montpellier.fr/moodle/pluginfile.php/18438/mod_resource/content/3/Chapitre%209%20-%20Aspects%20microscopiques%20-%20Activite%203.pdf

I Chiralité : propriétés chimiques

I.1 Stéréoisomères de configuration

Contenu : définition de molécules énantiomères et diastéréoisomères et exemples, comparaison des propriétés (biochimiques, chimiques et physiques)

Manipulation : mesure température de fusion de deux diastéréoisomères : l'acide maléique et fumarique. L'acide maléique (Z) a une température de fusion inférieure à l'acide fumarique. Ceci s'explique par la présence d'une liaison hydrogène intramoléculaire diminuant ainsi le nombre de liaisons hydrogène intermoléculaires ce qui a pour effet de le rendre moins stable.

I.2 Mélange racémique

Contenu : définition, application en chimie organique (exemple de la substitution nucléophile d'ordre 1 qui conduit à un mélange racémique, attaque du carbocation plan par les deux côtés de façon équiprobable).

II Chiralité : propriétés physiques

II.1 Loi de Biot

Contenu : activité optique d'une molécule chirale, énoncé de la loi de Biot, et additivité, lévogyre, dextrogyre.

Manipulation : mesure du pouvoir rotatoire du limonène (R)ou (S)

II.2 Excès énantiomérique

Contenu : définition et calcul à partir d'un pouvoir rotatoire.

Manipulation bonus : composition d'un mélange d'énanthiomères de limonène (R) et (S) grâce à la mesure du pouvoir rotatoire total

III

III.1

IV Conclusion

Leçon 33

Electrolyse - électrosynthèse

Bibliographie

Titre	Auteur(s)	Editeur (année)	ISBN
Chimie tout-en-un PC/PC* Chap 13 https://spcl.ac-montpellier.fr/moodle/course/view.php?id=62&section=10	A. Demolliens Académie Montpellier	Nathan (2009)	
Epreuve orale de Chimie (p194 et p398)	F. Porteu-de-Buchère	Dunod (2017)	

Plan détaillé

Niveau : Terminale STL-SPCL

Introduction pédagogique

Prérequis

—

Contexte :

Notions importantes

Objectifs

- 4 premiers points du BO

Difficultés

- Identification des électrodes
- Sens de déplacement des ions et des électrons
- Difficultés calculatoires : décomposer les étapes de calculs
- stœchiométrie des équations

Introduction

On a vu dans un cours précédent que des réactions sont spontanées : rouille du fer, dépôt vert dans les canalisations. Peut-on faire la réaction inverse ?

Expérience introductory : tube en U avec des ions cuivres $2+$, du solide Cu(s) se forme sur une électrode. C'est ce qu'on appelle un électrolyseur. On va essayer de comprendre comment ça marche.

I L'électrolyseur

I.1 Principe

Schéma de l'expérience précédente. L'électrolyte est du sulfate de cuivre CuSO_4^{2-} , les électrodes sont en graphite. Les électrons se déplacent dans le sens opposé au courant.



Le générateur impose le sens du courant et donc le sens de déplacement des électrons.

I.2 Equations aux électrodes

Electrode connectée à la borne - : arrivée d'électrons, on a réductions des ions cuivres : c'est la **cathode**.

Electrode connectée à la borne + : on a oxydation de l'eau : $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 4e^-$: c'est l'anode.

On appelle transformation chimique **forcée** une transformation qui a lieu dans le sens opposé au sens thermodynamiquement favorisé.

L'équation de la réaction de l'électrolyse s'écrit :

$$blabla \quad (33.1)$$

II Bilan de matière sur un électrolyseur

II.1 Conservation de l'électricité

La quantité d'électricité traversant un circuit électrique est :

$$Q = I\Delta t \quad (33.2)$$

Q peut aussi être liée à la quantité d'électrons échangés :

$$Q = n_e F \quad (33.3)$$

avec $F=96500\text{C.mol}^{-1}$ la constante de Faraday.

Application : $\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}(s)$ donne $n_{\text{Cu}} = \frac{I\Delta t}{2F}$ et pour $I=0.1\text{A}$ pendant 10min donne $m_{\text{Cu}} = 30\text{mg}$.

II.2 Rendement de l'électrolyse

Le rendement de l'électrolyse est donné par :

$$\eta = \frac{m_{\text{cu},\text{exprial}}}{m_{\text{Cu},\text{theorique}}} \quad (33.4)$$

- $\eta = 0$, pas effective,
- $\eta = 1$, rendement maximal.

III Application : purification

Dans l'industrie, on utilise une électrolyse à anode soluble pour purifier les minéraux. Le minerai pas pur en cuivre va être soumis à un potentiel et va libérer le cuivre qui va se déposer sur une électrode plus pure. Schéma de l'expérience.

Manipulation quantitative : on impose I avec un générateur sur deux électrodes de cuivre. Le courant à $t=0$ vaut 470mA mais se stabilise à 470mA au bout de 2 minutes. On observe une couleur saumon sur la cathode qui vient du dépôt de cuivre. On rince la cathode à l'eau distillée. On sèche délicatement (le dépôt est fragile). On sèche au décapeur thermique.

Calcul du rendement, propagation d'incertitude.

Conclusion

Utilité : synthèse de l'eau de javel, synthèse de dihydrogène pour la pile à combustible, électrozingage.

Leçon 34

Oxydoréduction

Bibliographie

Titre	Auteur(s)	Editeur (année)	ISBN
Chimie PCSI Chap 12 https://spcl.ac-montpellier.fr/moodle/course/view.php?id=61&section=4	J-B Baudin Académie Montpellier	Dunod (2019)	
BO Terminale STL/SPCL	Sujet bac pour l'hydrolyse de l'eau dans l'ISS		

Plan détaillé

Niveau : Terminale STL-SPCL

Introduction pédagogique

Prérequis

- titrages
- Réactions acide/base
- potentiel électrique

Contexte : Premier trimestre

Notions importantes

Objectifs

Difficultés

- formule de Nernst : mathématique

Introduction

Manipulation introductive : Pile Daniell. On observe une différence de potentiel, pourquoi ?

I Oxydants et réducteurs (5min)

I.1 Définitions

Oxydant : espèce capable de capturer un ou plusieurs électrons. Ex : Zn^{2+} ou Cu^{2+} .

Réducteur : espèce capable de capter un ou plusieurs électrons. Ex : Cu(s) ou Zn(s) .

I.2 Couple oxydant-réducteur

A tout oxydant est associé un réducteur qui sont reliés par une demi-équation électronique.

Exemple : $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cu(s)}$.

Remarque : on peut écrire de manière plus générale pour un couple oxydant (Ox)/réducteur (Red) :

$$\text{Ox} + n \times e^- = \text{Red} \quad (34.1)$$

Remarque : il faut équilibrer les réactions redox. Exemple du couple $\text{Mn}^{2+}/\text{MnO}_4^{2-}$.

II Réaction d'oxydoréduction (5min)

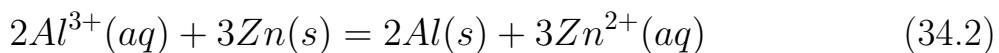
II.1 Définition

Dans une réaction d'oxydoréduction, les réactifs sont un oxydant et un réducteur de deux couples différents : il y a un transfert d'électrons.

Exemple :

- $\text{Al}^{3+}/\text{Al(s)}$
- $\text{Zn}^{2+}/\text{Zn(s)}$

On écrit les deux demi-équations redox et on obtient les équations bilans :



II.2 Réactions en milieu acide/basique

En milieu acide

Exemple de $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{3+}$ avec $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}_2$. Cette réaction nécessite des ions H^+ pour avoir lieu donc elle doit se passer en milieu acide.

En milieu basique

Exemple de $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{3+}$ avec CNO^-/CN^- . Elle nécessite des ions HO^- pour se faire donc un milieu basique.

III Potentiel d'un couple redox (5-10min)

III.1 Principe de la mesure : retour sur la pile

- Une pile est constitué de deux demi-piles reliées par un pont salin,
- Chacune d'entre elle est constituée d'un couple redox auquel est associé un potentiel E (en V),
- Ce potentiel s'obtient en mesurant la différence de potentiel entre une demi-pile que l'on souhaite étudier et une autre demi-pile au potentiel fixé/connu : l'électrode standard à hydrogène (théorique, $E=0\text{V}$) ou l'Electrode au Calomel Saturé (pratique, $E=0.24\text{V}$)

III.2 Potentiel standard d'un couple rédox

Potentiel d'un couple dans les conditions standard telles que : P=1bar et T=25°C.

III.3 Relation de Nernst

Relation qui permet de calculer le potentiel d'un couple redox. Pour une équation redox $\alpha Ox + ne^- = \beta Red$, la relation de Nerst s'écrit :

$$E(Ox/red) = E^0(Ox/red) + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{[Ox]_{eq}^\alpha}{[Red]_{eq}^\beta} \right) \quad (34.3)$$

IV Titrage d'oxydo-réduction

Titrage dont la réaction de support est une réaction d'oxydo-réduction.

[Expérience quantitative](#) : Titrage des ions Fe^{2+} par les ions Ce^{4+} . Ca sert pour le vin.

Conclusion

Leçon 35

Conductimétrie

Bibliographie

Titre	Auteur(s)	Editeur (année)	ISBN
PC Tout-en-un MPSI	Bruno FOSSET, Jean-Bernard BAUDIN, Frédéric LAHITÈTE	Dunod	
Ressources en ligne		Eduscol	

Plan détaillé

Niveau : Tle STL - SPCL

Pré-requis :

- Loi d'Ohm
- Dosage
- Solubilité/précipitation

Introduction pédagogique

Leçon placée en début d'année de terminale.

Prérequis

- Loi d'Ohm
- Dosage
- Solubilité / Précipitation

Notions importantes

- Conductance/conductimétrie.
- Electrolyte.
- Loi de Kohlrausch.
- Prévoir l'allure de titrage.

Objectifs

- Principe du conductimètre.
- Loi de Kohlrausch.
- Titrage par conductimétrie.

Difficultés

- Beaucoup de grandeurs différentes avec différentes unités : conductance, conductivité (Siemens).
- Cellule conductimétrique (vs. électrodes connues) et fonctionnement du conductimètre.
- Ions mobiles qui conduisent en solution.
- Prévoir l'allure $\sigma(V)$ (méthode du tableau)

Introduction

Question : Quelle est la condition pour qu'une solution conduise le courant ?

Manipulation qualitative : Solution d'eau distillée dans laquelle on fait passer le courant d'une pile reliée à une ampoule (ou une LED) : l'ampoule ne s'allume pas. Elle s'allume si on rajoute du sel (cf. exp 1).

I Conductance et conductivité

I.1 Définitions

Electrolyte Solution capable de conduire le courant en présence d'ions mobiles.
ex : eau salée Na^+ et Cl^- .

Conductance $G = \frac{1}{U} = \frac{1}{R}$. Unité : $S = \Omega^{-1}$ (Siemens). Cette grandeur n'est pas intrinsèque à la solution.

I.2 Présentation du conductimètre

Conductivité Schéma de fonctionnement d'un conductimètre : une **cellule conductimétrique** constituée de deux plaques parallèles de surface immergée S et séparées d'une distance L .

Conductivité : $\sigma = \frac{GL}{S}$ en $S.m^{-1}$, avec S la surface d'une plaque de la cellule conductimétrique et L la distance entre les deux plaques.

I.3 Facteurs d'influence de la conductivité (16')

Manipulation : Mesure de la conductivité de deux solutions (NaCl et KCl) (cf. exp 2). $\sigma(eKCl) = 10,32 \text{ mS.cm}^{-1}$ et $\sigma(KCl) = 12,17 \text{ mS.cm}^{-1}$

- σ dépend de la nature des ions mobiles.
- σ dépend de la température.
- σ dépend de la concentration des ions présents en solution.

I.4 Loi de Kohlrausch (19')

Soit n ions présents dans un électrolyte, on a

$$\sigma(T) = \sum_i z_i \lambda_i^0(T) C_i \quad (35.1)$$

avec :

z_i le nombre de charge de l'ion i , ex : $z(\text{Na}^+) = 1$, $z(\text{Cl}^-) = 1$.

C_i la concentration de l'ion i en mol.L^{-1}

$\lambda_i^0(T)$ la conductivité molaire ionique à dilution infinie de l'ion i en $\text{S.m}^2.\text{mol}^{-1}$.

Elles sont tabulées à 25°C.

II Application : titrage par précipitation (24'50)

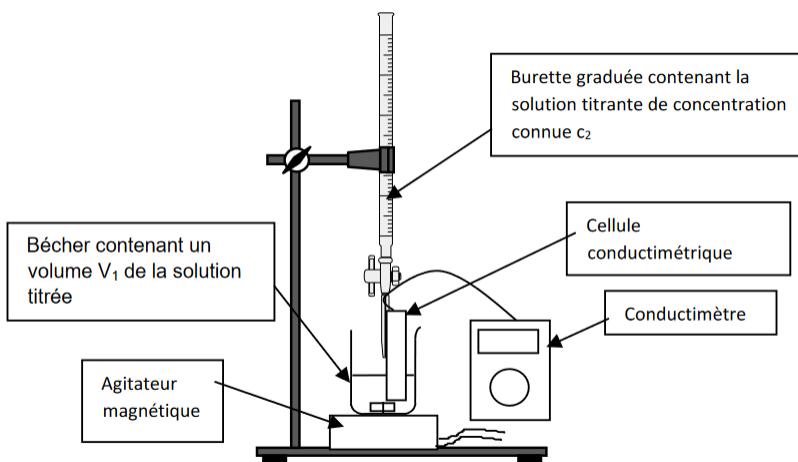
cf. exp 3.



II.1 Analyse qualitative

Tableau de réaction qualitatif. Avant l'équivalence : Na^+ reste constante, Cl^- diminue, NO_3^- augmente, Ag^+ disparaît. Comme $\lambda^0(\text{Cl}^{-1}) > \lambda^0(\text{NO}_3^{-1})$, la conductivité diminue. Après l'équivalence : Na^+ reste constante, Cl^- a disparu, NO_3^- augmente, Ag^+ augmente. Comme $\lambda^0(\text{Cl}^{-1}) > \lambda^0(\text{NO}_3^{-1})$, la conductivité augmente.

II.2 Détermination de la concentration en ions chlorure dans le serum physiologique



Courbe $\sigma(V)$. La détermination du volume équivalent permet de remonter à la concentration des ions Cl^- .

III Conclusion

Application titrage pour sonder la qualité de l'eau.

Questions posées

- Est-ce que c'est important de connaître la valeur du volume d'eau ajouté dans le bêcher contenant le réactif titrant lors du titrage conductimétrique ?
Non, ce n'est pas important pour déterminer le volume équivalent lors du titrage.
- Pourquoi diluez-vous ? **Pour pouvoir s'affranchir de la dilution, i.e. obtenir**

des courbes affines de $\sigma(V)$. Si la solution n'est pas assez dilué on obtient des branches d'hyperbole, qu'on peut corriger en représentant non pas la conductivité σ mais la conductivité corrigée $\sigma_{cor} = \sigma \times \frac{V_{tot}}{V_0}$. D'autre part, ça permet d'avoir assez d'eau pour y immerger l'électrode.

- Le point à $1mL$ dévie de la droite, pourquoi? Cela peut être dû au fait qu'à ce volume, on n'est pas forcément dans le régime linéaire de la loi de Kohlrausch.
- Vous donner comme exemple le titrage des ions nitrate. Comment proposez-vous d'en déterminer la concentration ? En réalisant le même titrage que pour les ions chlorure. Peut-on dans ce cas déterminer séparément la concentration des 2 analytes (NO_3^- et Cl^-) ? Non.
- Qu'est-ce qu'on peut chercher d'autre dans l'eau ? Les organismes vivants dans l'eau en ont besoin. Oxygène. Comment le titrer ? Titrage par la méthode de Winkler. Quels seraient les deux couples en jeu ? Pas si simple. Il y a bien sûr le couple de l'eau faisant intervenir le dioxygène $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ mais aussi des couples du manganèse et de l'iode (voir protocole étudié en TD, diagramme E-pH à l'appui).
- Et pour la consommation humaine, que peut-on titrer d'autre ? Les minéraux, comme Ca^{2+} ou Mg^{2+} . Pourquoi vouloir déterminer la concentration en ions calcium et magnésium ? Le calcium peut précipiter avec les ions carbonates CO_3^{2-} pour former le carbonate de calcium (c'est-à-dire le calcaire) CaCO_3 (qui bouche les canalisations). Comment les titrer les ions calcium et magnésium ? Il s'agit d'un titrage complexométrique, le réactif titrant est l'EDTA (éthylènediaminetétracétate), l'indicateur colorée est le NET (pour la dureté totale i.e. $[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]$) en tampon ammoniacal à pH 10 et murexide en tampon pH 12 (pour la dureté magnésienne i.e. $[\text{Mg}^{2+}]$)
- Peut-on mettre du magnésium métallique dans l'eau ? Non, c'est un alcalino-terreux et il réagit fortement en présence d'eau. C'est dangereux ? Oui, ça s'enflamme.
- Comment vous justifiez le choix des doubles flèches dans l'équation de titrage ? J'aurais dû mettre une flèche simple car c'est une réaction totale dans le sens de la précipitation. À ce propos, voir pour information l'article rédigé par M.Vigneron, X. Bataille et M-B. Mauhourat dans L'Actualité Chimique N°399 de août-septembre 2015 et intitulé « Du bon usage de la flèche comme symbole de la transformation chimique » disponible librement au lien suivant : <https://new.societechimiquedefrance.fr/numero-du-bon-usage-de-la-fleche-comme-symbole-de-la-transformation-chimique>

- λ^0 . Que signifie le 0 ? Dilution infinie : la loi de Kohlrausch est définie pour des ions infiniment diluées (état hypothétique).
- Comment avez-vous étalonné le conductimètre ? J'ai utilisé une solution étalon KCl (chlorure de potassium) pour laquelle on connaît la conductivité en fonction de la température (table de valeurs disponible avec la notice du conductimètre).
- Parle-t-on d'électrode en conductimétrie ? Non, il s'agit d'une cellule conductimétrique.
- Pourquoi porter des gants ? NaCl a forte concentration peut-être irritant. Non, NaCl n'est que du sel de cuisine !
- Quelle est votre politique d'utilisation des gants pour les acides et bases ? J'en mets dès que la concentration dépasse 10^{-2} M.
- Pourquoi potassium et sodium ont-ils des conductivités molaires ioniques différentes ? Taille des noyaux différents et interaction avec les autres ions (VDW, polaire, etc.) différentes. En somme leur rayon de solvatation n'est pas le même.
- Sources de la leçon ? Eduscol, il y a des fiches pour la leçon. Dunod MPSI pour la loi de Kohlrausch. Expérimental : source interne à l'agreg.
- Qu'est-ce qui vous a donné l'idée de l'introduction avec la pile ? Une source interne à l'agreg (mais ce n'est pas ça qu'il faut dire devant le jury...) Cela a un intérêt pédagogique.
- D'après votre introduction pédagogique, les élèves ne connaissent pas la notion de pile. Je ne pense pas que ça gêne, les élèves manipulent des piles dans leur quotidien.
- Quelle est la nature du courant en entrée du conductimètre ? Un courant alternatif pour éviter de polariser les plaques de la cellule et donc de former un condensateur.
- Que proposez-vous en séance de travaux pratiques ? Le titrage du sérum physiologique, c'est pédagogique car c'est un produit du quotidien.
- Comment situez-vous la conductimétrie par rapport à d'autres techniques ? Je dirais que c'est complémentaire de la pH-métrie par exemple, notamment quand on est dans les conditions d'un saut de pH de faible amplitude qui rend imprécise la détermination de l'équivalence.
- Est-ce que ça fonctionne toujours bien ? Il faut une réaction de titrage thermodynamiquement favorable. Au niveau de l'exploitation, il faut des droites

de pentes nettement distinctes pour une détermination aisée et précise du volume équivalent.

Commentaires

Avoir du matériel en rab au cas où.

Attention aux gants lorsque c'est inutile.

Intro pédagogique était bien, un peu trop longue.

Conductance et conductimétrie pourrait être dans la même partie.

Il faut employer le mot "cellule".

Tu pourrais utiliser une flexcam pour que le jury voit les valeurs.

Tu as donné beaucoup de valeurs de λ_i^0 . Je te conseille de les projeter.

J'aurais mis un = à la place des flèches.

Prends plus de place pour faire ton tableau.

C'est un peu dangereux de mettre l'expérience principale à la fin de la leçon.

Rester motivé jusqu'à la fin.

Expérience 1

Titre : Illustration solution conductrice avec allumage d'une ampoule.

Référence complète : (référence interne à l'agreg, compte rendu d'une leçon précédente)

But de la manip : montrer que seule la solution d'eau dans laquelle on a ajouté du sel peut allumer l'ampoule : montrer ce qu'est un électrolyte.

Commentaire éventuel : Attention à brancher la LED dans le bon sens ! Et demander une pile supplémentaire au cas où elle soit déchargée.

Phase présentée au jury : Circuit ampoule + batterie + deux plaques de cuivre plongées dans une solution. Avec solution = eau distillée : l'ampoule ne s'allume pas. Avec de l'eau salée, l'ampoule s'allume.

Durée de la manip : 2'

Expérience 2

Titre : Mesure de la conductivité de deux solutions (NaCl et KCl).

Référence complète :

Équation chimique et but de la manip : Montrer que deux électrolytes conduisent différemment. Discuter autour du rayon de solvatation.

Phase présentée au jury : Mesure avec un conductimètre de deux solution (NaCl et KCl).

Durée de la manip : 2'

Expérience 3

Titre : Titrage conductimétrique d'un sérum physiologique

Référence complète : Hatier, Physique-Chimie Tle spé, 2012, pp. 467-477.

Équation chimique et but de la manip : $\text{Cl}_{(\text{aq})}^- + \text{Ag}_{(\text{aq})}^+ = \text{AgCl}_{(\text{s})}$

Commentaire éventuel : Prévoir une deuxième propipette si celle que vous avez est abimée. Par ailleurs, c'est toujours risqué de vouloir ajouté un point au milieu d'une courbe déjà pré-tracée. Ce n'est pas du tout sûr qu'il tombe bien. Mais comme on n'a pas trop le choix au vu de l'exercice demandé, il faut s'y attendre et prévoir de commenter...

Phase présentée au jury (pendant la séance de question car la manip prévue en fin de leçon n'a pas pu être réalisée par manque de temps) : Prélèvement de la solution titrante de nitrate d'argent à l'aide d'une pipette jaugée (10mL). Ajout de 50 mL d'eau distillée pour avoir suffisamment de solution pour la cellule soit complètement immergée dans la solution à titrer. Mesure d'un point (ajout d'un volume de nitrate d'argent et mesure de la conductivité). Ajouter ce point à la courbe établie lors de la préparation. Commenter si cette valeur est différente de celle attendue dans la courbe (température différente, concentration de la solution différente, etc...)

Durée de la manip : (de 35'30 - fin)

Compétence « Autour des valeurs de la République et des thématiques relevant de la laïcité et de la citoyenneté »

Question posée : Qu'est-ce qu'un bon établissement scolaire ?

Réponse proposée : Il faut d'abord définir ce qu'est un établissement scolaire. Matériellement c'est une structure, des salles de classes, du matériel. Un bon établissement est une structure capable de fournir un bon cadre matériel au bon déroulé de l'apprentissage. D'autre part, ce sont des ressources humaines, donc un bon établissement, ce sont des gens qui collaborent bien. Enfin, un bon moyen de reconnaître si un établissement est bon est de suivre le devenir des élèves à la sortie de cet établissement.

Commentaire du correcteur : Bien. De nombreux mots-clés ont été mobilisés. L'écueil principal de cette question consiste à résumer un bon établissement scolaire à un bon pourcentage de réussite au baccalauréat ou d'intégration des filières d'élite. À éviter !

Champ libre pour le correcteur

Remarques sur le plan Le plan nécessite d'être revu pour plusieurs raisons. Tout d'abord l'expérience quantitative de titrage du sérum physiologique **ne tient pas dans le temps imparti** et c'est un problème. De manière générale, il est préférable que l'expérience principale ne soit pas prévue à la fin de la leçon ou au moins qu'elle soit suivie d'une partie tampon que vous pouvez éventuellement supprimer si vous manquez de temps. Dans tous les cas, vous devez avoir l'œil sur votre chronomètre et savoir à quel moment vous avez prévu de passer à la partie ou sous-partie suivante : tout doit être minuté. Une leçon se répète en amont de la présentation, c'est à mettre en place avec votre binôme jusqu'à ce que vous soyez à l'aise.

D'autre part, il y a beaucoup (**trop**) de **définitions**. Il convient de faire un tri entre celles qui sont les plus importantes et méritent d'être écrites au tableau, celles moins importantes qui peuvent être affichées sur diapositives et celles anecdotiques qu'on peut soit ignorer soit reléguer dans les pré-requis. Par exemple pour la première partie, je propose de renommer ainsi les sous-parties : 1/ Définitions ; 2/ Présentation du conductimètre ; 3/ et 4/ inchangées.

Vocabulaire Dans cette leçon il est primordial d'utiliser le bon vocabulaire. Il convient notamment de parler de **cellule conductimétrique** et non d'électrode, ou encore de faire la distinction entre la **conductivité ionique molaire** et celle à dilution infinie.

Équipements de protection individuelle Vous devez avoir du discernement quant au port des **gants**. Il est aberrant d'entendre que NaCl est une espèce毒ique qui nécessite de porter des gants alors que vous l'utilisez quotidiennement en cuisine ! Par ailleurs, assurez-vous d'avoir une **blouse** qui couvre vos bras jusqu'au bout des manches du pull / t-shirt / chemise que vous portez en-dessous.

Autre expérience possible Si vous envisagez d'illustrer le facteur d'influence qu'est la température, sachez que vous avez à votre disposition des bêchers thermostatés. Ce sont des bêchers à double paroi qu'on peut relier par des tuyaux (du même type que ceux qu'on utilise pour les réfrigérants) au bain thermostaté. Cependant, il ne faut pas rajouter une expérience supplémentaire à la leçon telle qu'elle a été présentée. Ce serait en remplacement.

Quelle flèche utiliser ? Pour les équations de réaction en chimie générale, lorsqu'on s'intéresse aux bilans, je vous conseille d'utiliser le signe « égal », même s'il y a précipitation.

Utilisation de la pipette jaugée Je rappelle la façon correcte de prélever à la pipette jaugée. La pipette doit être tenue verticalement. La main qui tient la pipette (en bas) tient également le bêcher (soit de prélèvement, soit celui dans lequel on compte verser la solution prélevée). Le bêcher est incliné à 45°. L'extrémité inférieure de la pipette (par où s'écoule la solution) est en contact avec la paroi du bêcher (immergée si c'est un prélèvement, émergée si l'on est en train de vider la pipette). La seconde main est stabilisatrice en haut de la pipette et manipule la propipette. Lors du prélèvement, il faut toujours dépasser le trait de jauge puis ajuster en descente. La pipette jaugée est une verrerie « ex ». Elle est faite pour délivrer le volume indiqué par le constructeur (et non pas pour contenir ce volume, contrairement à la fiole jaugée qui est une verrerie « in »). Dans le cas d'une pipette à 1 trait, peu importe la goutte qui resterait en bas de la pipette une fois celle-ci vidée, le volume est calculé en tenant compte, à condition qu'elle est été utilisée canoniquement avec ce fameux contact verre-verre permis par l'inclinaison à 45° de l'ensemble pipette + bêcher. Pour information, la pipette jaugée est calibrée pour prélever une solution aqueuse et perd en précision si elle

est utilisée pour prélever un liquide organique.

Leçon 36

Cinétique électrochimique

Bibliographie

Titre	Auteur(s)	Editeur (année)	ISBN

Plan détaillé

Niveau : PSI

Introduction pédagogique

Prérequis

- Oxydoréduction
- Thermochimie

Contexte :

Notions importantes

- Vitesse de réaction

Objectifs

- Tracer une courbe intensité-potentiel

- déterminer la solubilité et prévoir son évolution

Difficultés

- Réaction en milieu hétérogène
- Pk montage à 3 électrodes

Pour y remédier, différencier milieu homogène, milieu hétérogène.

Introduction

Réaction à la surface d'une électrode. On va relier vitesse et thermodynamique.

I Réaction électrochimique

I.1 Description

On s'intéresse à l'équilibre :

$$Red = Ox + ne^- \quad (36.1)$$

Ex : $Fe^{2+} = Fe^{3+} + 1 e^-$. Cette réaction n'a pas de réalité physique car l'électron n'existe pas en solution. En revanche, à la surface d'une électrode métallique, il y a formation d'un électron libre : c'est ce qu'on appelle une réaction électrochimique.

I.2 Facteur cinétique

En milieu homogène :

- La proba de rencontre entre deux réactifs
- La proba que la réaction se produise quand les réactifs sont en contact

En milieu hétérogène :

- Les réactifs doivent atteindre la surface de l'électrode
- le transfert d'électron doit se produire
- le produit doit s'éloigner de la surface de l'électrode

Schéma (slide) étapes d'une réaction électrochimique.

I.3 Intensité et vitesse de réaction

Rappel : la vitesse de réaction v est égale à la dérivée temporelle de l'avancement ξ .

En milieu homogène, on s'intéresse à des vitesses volumiques. Ici, il est plus adéquat de considérer des vitesses surfaciques.

définition : En notant A la surface immergée de l'électrode :

$$v = \frac{1}{A} \frac{d\xi}{dt} = \frac{1}{nA} \frac{dn_{e^-}}{dt} \quad (36.2)$$

Ex : pour $\text{Fe}^{2+} = \text{Fe}^{3+} + 1 \text{ e}^-$, $n = 1$. Comme la variation de la quantité de matière d'électron échangée est proportionnelle à la variation de charge :

$$dq = Fdn_{e^-} \quad (36.3)$$

On a finalement :

$$\frac{1}{nAF} \frac{dq}{dt} = \frac{i}{nAF} = \frac{j}{nF} \quad (36.4)$$

convention : On définit positivement le courant anodique i_a i.e. lié à l'oxydation et négativement le courant cathodique i_c provoqué par la réduction.

II Courbe intensité-potentiel

II.1 Montage à 3 électrodes

Slide montage à deux électrodes : ne fonctionne pas.

Objectif : étudier le courant en imposant un potentiel à l'électrode de travail.

Pour garder un potentiel fixe à l'électrode de travail on a besoin d'un montage à 3 électrodes. (24')

Schéma du montage à 3 électrodes.

La contre-électrode permet de fermer le circuit électrique sans que du courant ne passe par l'électrode de référence. Utilité d'un générateur : sert à imposer une différence de potentiel. Le potentiostat permet d'imposer la différence de potentiel.

II.2 Limitation de la cinétique

- **transfert de charge** : transfert électronique à l'interface électrode/solution

- **transfert de matière** : Comprend les phénomènes de diffusion et de convection

II.3 Système lent (34')

Transfert de charge cinétiquement déterminant. Il existe une surtension à appliquer pour observer un courant dans l'électrode.

Définition surtension anodique/cathodique à l'aide d'un schéma.

II.4 Système rapide (40')

[expérience](#) : Tracer d'une courbe intensité-potentiel

III Conclusion

Leçon 37

Diagrammes E-pH

Bibliographie

Titre	Auteur(s)	Editeur (année)	ISBN
BUP n°790			

Plan détaillé

Niveau : TSI2

Introduction pédagogique

Prérequis

- Réactions redox
- Réactions A/B
- Potentiel de Nernst

Contexte : Place de la leçon : milieu d'année.

Notions importantes

—

Objectifs

Difficultés

Introduction

Question :

Manipulation qualitative :

I Lecture d'un diagramme E-pH

I.1

Déf : diagramme E-pH. Exemple du diagramme du Fer.

I.2 Calculs des équations aux frontières

II Utilisation d'un diagramme potentiel pH

II.1 Diagramme potentiel-pH de l'eau

III Utilisation d'un diagramme E-pH à des fins expérimentales

III.1 Procédé industriel à l'aide d'un diagramme E-pH

Présentation de la méthode de Winkler.

IV Conclusion

Questions posées

—

Commentaires

Expérience 1

Titre :

Référence complète :

But de la manip :

Commentaire éventuel :

Phase présentée au jury :

Durée de la manip :

Expérience 2

Titre :

Référence complète :

Équation chimique et but de la manip :

Phase présentée au jury :

Durée de la manip :

Expérience 3

Titre :

Référence complète :

Équation chimique et but de la manip :

Commentaire éventuel :
Phase présentée au jury

Durée de la manip :

Compétence « Autour des valeurs de la République et des thématiques relevant de la laïcité et de la citoyenneté »

Question posée :

Réponse proposée :

Commentaire du correcteur :

Champ libre pour le correcteur

Remarques sur le plan

Vocabulaire

Équipements de protection individuelle

Leçon 38

Synthèse, traitement et caractérisations

Bibliographie

Titre	Auteur(s)	Editeur (année)	ISBN

Plan détaillé

Niveau : 1ère Générale

Introduction pédagogique

Prérequis

- Modélisation d'une transfo chimique par une réaction chimique
- Caractéristiques physico-chimiques d'espèces chimiques
- Techniques expérimentales

Contexte : Leçon de milieu d'année après Structure des entités organiques.
2ème chimique de chimie orga.

Notions importantes

Objectifs

- Compétences expérimentales : montage à reflux, filtration, lavage, séparation. Caractérisations par CCM
-

Difficultés

- Vocabulaire spécifique
- Aspect inventaire

Introduction

Synthèse organique dans la vie de tous les jours synthèse du paracétamol, synthèse de l'indigo (pour les jeans). Intérêt : produire de façon massive des molécules qui existent déjà dans la vie de tous les jours.

I Synthèse en chimie organique

I.1 Qu'est-ce-qu'une synthèse ?

Définition : Une synthèse = ensemble des étapes de fabrication d'une ou plusieurs espèces chimiques purs, impliquant la transformation chimique de réactifs.

Ex : acide benzoïque (formule chimique semi-développée pas à connaître). Présentation du montage. A la fin de synthèse, on a retiré le produit obtenu et on l'a filtré à l'aide d'un papier filtre. On va étudier le filtrat. Présentation de la filtration sur Büchner.

Etapes d'une synthèse :

1. Transformation chimique
2. Extraction du milieu réactionnel
3. Identification du produit et analyse de la pureté
4. Purification éventuelle

I.2 La transformation chimique

Les réactifs sont transformés en produits selon l'équation de réaction.

Ex : Synthèse de l'acide benzoïque



Paramètres :

- Chauffage : accélère la réaction (ex : chauffage à reflux)
- Solvant : les réactifs doivent y être tous solubles si possible
- Autres : agitation, concentrations réactifs, catalyseur, ...

II Extraction du produit du mélange réactionnel

II.1 Cas où l'espèce est un liquide

- Si l'espèce est non-miscible avec le solvant : décantation
- Si l'espèce est miscible avec le solvant et que sa température d'ébullition diffère de plus de 20°C avec celle du solvant : distillation fractionnée

II.2 Cas où l'espèce est un solide

On réalise une filtration simple ou sur filtre sur Büchner.

II.3 Cas où l'espèce est un soluté

On change les conditions expérimentales. On peut :

- baisser le pH
- diminuer la température
- introduire une espèce plus soluble : cristalliser le soluté
- ou sinon on peut réaliser une extraction liquide-liquide

III Efficacité de la synthèse

III.1 Identification du produit

- CCM,
- mesure de la température de fusion,
- spectre infrarouge,
- mesure de la masse molaire,
- mesure T_{eb} pour un liquide.

III.2 Purification

Cette étape permet d'éliminer les impuretés contenues dans le brut.

Ex : recristallisation. On dissout le produit d'intérêt dans un solvant dans lequel il est soluble à chaud mais pas à froid, les impuretés sont solubles à chaud ou à froid. Etalonnage du banc Kofler.

Conclusion

Dans une prochaine leçon, on verra les notions de rendements.

Leçon 39

Biomolécules et énergie

Bibliographie

Titre	Auteur(s)	Editeur (année)	ISBN

Plan détaillé

Niveau : 1ère ST2S

Introduction pédagogique

Prérequis

- Description des molécules
- Molécules d'intérêt biologique (glucide, lipide, protides (acides aminés, petites protéines))
- Energie en alimentation (calorie)
- réaction de combustion

Contexte : Dernière leçon sur les biomolécules

Notions importantes

—

Objectifs

- Comprendre l'intérêt des biomolécules
- déterminer les transfo possibles

Difficultés

- vocabulaire spécifique
- nombreuses transformations chimiques avec des molécules de grandes tailles

Introduction

Quels intérêts des molécules pour le corps humain ? Energie apportée par ces molécules.

I Les biomolécules pour l'organisme

I.1 Les biomolécules comme sources d'énergie

3 nutriments majoritaires :

- protides : 4kcal/g de protides, servent aux structures pour les autres composés biologiques du corps et au fonctionnement. Elles représentent 17% de l'énergie apporté au corps humain
- lipides : 9kcal/g. Effort physique assez important. 35-40% des besoins énergétiques de l'organisme. Problème : le transformer en énergie par le corps humain
- glucides : 4kcal/g. Source d'énergie majoritaire pour le corps humain. Moitié des besoins en énergie pour l'organisme.

Apport journalier en énergie : 2000kcal pour un humain normalement constitué.

Manip quali : tests de caractérisation lipides/glucides/protides : test de bi-urée (en milieu basique).

I.2 Exemple des glucides

Glucides : hydrates de carbone : $C_x(H_2O)$

- simple : non hydrolysable, monosaccharide
- complexe : combinaison de plusieurs glucides simples : hydrolysable.

Ex simple : glucose, fructose, galactose qui sont des isomères de constitution $C_6H_{12}O$.

Ex complexe : bisaccharide : saccharose : glucose + fructose, maltose : 2 glucoses, lactose : glucose + galactose. Polysaccharides : amidons, glycogène.

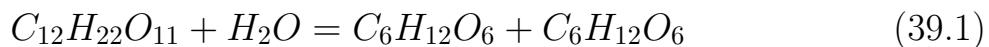
[lancement manip imposée : hydrolyse d'un glucide complexe](#) cf Nathan ST2S.

II Transformation biochimique dans l'organisme

II.1 La réaction d'hydrolyse

[Définition](#) : Une réaction de rupture de liaison covalente au sein d'une molécule par action d'une molécule d'eau. Elle permet de former deux plus petites molécules.

Ex : hydrolyse de saccharose dont l'équation bilan est :



Cependant c'est une réaction lente. C'est pourquoi on procède à un montage à reflux pour augmenter la température et on a ajouté un catalyseur : acide chlorhydrique. Dans le corps humain, les catalyseurs sont les enzymes.

II.2 Transformation du glucose et production d'énergie

2 voies possibles :

- aérobie en présence d' O_2
- aérobie sans d' O_2

1ère étape de glycolyse (acide pyruvique) :



[On arrête la manip. Pas forcément utilisable dans le temps imparti de la leçon. Mais hydrolyse faite en préparation et utilisable. Test à la liqueur de Fehling.](#)

III Conclusion

On a pu voir les molécules qui apportent l'énergie.

Leçon 40

Gestion des risques en laboratoire de chimie

Bibliographie

Titre	Auteur(s)	Editeur (année)	ISBN

Plan détaillé

Niveau : 1ère ST2S

Introduction pédagogique

Prérequis

—

Contexte : Leçon de début d'année.

Notions importantes

—

Objectifs

—

Difficultés

Introduction

Produit ménagers = 12000 morts/an en France. Phrase d'accroche : on a ici de l'eau de javel, ici un détartant comme le vinaigre. Il ne faut surtout pas les mélanger ! On va essayer de comprendre pourquoi.

I Manipuler en sécurité

I.1 Les bons gestes

- Porter une blouse
- Porter des lunettes
- Attacher ses cheveux
- Porter des gants

En cas d'accident :

- Contact avec la peau : rincer abondamment
- contact avec les yeux : rincer avec le rince œil
- Inhalation : respirer de l'air frais
- boire de l'eau

I.2 Savoir lire les signes

- Pictogrammes de sécurité (description sur slide, source profpinnedon.ekablog.com)
- étiquettes : ex du méthanol

II Sécurité des produits acides et basiques

II.1 Couple acide/base

Définition (au sens de Brönsted) : Espèce chimique est une espèce susceptible de donner un proton. Une base est une espèce susceptible de capter un proton.

Cas particulier de l'eau (espèce ampholyte).

- Plus la solution est acide, plus $[H_3O^+]$ est importante.
- Plus la solution est acide, plus $[HO^-]$ est importante.

II.2 pH et concentration

définition : le pH quantifie l'acidité/la basicité d'une espèce chimique.
 $[H_3O^+] = -10^{-pH}$.

En pratique, on vérifie au papier pH l'acidité d'une solution. On peut aussi utiliser le pH mètre si on veut être précis lors d'une expérience.

II.3 Neutralisation

Manipulation imposée : neutralisation d'un acide

III Sécurité des produits oxydants et réducteurs

Antiseptique : agit sur les tissus vivants. Ex : I₂ dans la bétadine.

Désinfectant : tue tout objet inerte. Ex : ions ClO⁻ dans l'eau de javel.

III.1 Couple oxydo-réducteur

Définition : Un réducteur = espèce chimique capable de capter des électrons. Un oxydant = espèce chimique capable de céder des électrons.

III.2 Précautions d'emploi

- lire l'étiquette
- diluer
- ne pas mélanger

Ex : eau de javel + détartrant = formation de dichlore gazeux = mortel.

III.3 Neutralisation

- dilution
- neutralisation par mélange. Ex : $I_2 + 2S_2O_3^{2-} = 2I^- + S_4O_6^{2-}$

IV Conclusion

Leçon 41

Oxydoréduction

Bibliographie

Titre	Auteur(s)	Editeur (année)	ISBN
Chimie PCSI Chap 12 https://webetab.ac-bordeaux.fr/Pedagogie/Physique/Physico/Electro/e02gener.htm	J-B Baudin Académie Bordeaux	Dunod (2019)	
Epreuve orale de Chimie p196-201	F. Porteu-de-Buchère	Dunod (2017)	

Plan détaillé

Niveau : Terminale STL-SPCL

Introduction pédagogique

Prérequis

—

Contexte :

Notions importantes

Objectifs

Difficultés

Introduction

I Les biomolécules pour l'organisme

II Conclusion

Leçon 42

Métaux : structure et propriétés

Bibliographie

Titre	Auteur(s)	Editeur (année)	ISBN
PC Tout-en-un PSI/PSI*	B. Fosset, J.-B. Baudin	Dunod (2022)	

Plan détaillé

Niveau : MPSI

Pré-requis :

—

Introduction pédagogique

Prérequis

—

Notions importantes

—

Objectifs

Difficultés

Introduction

Métaux omniprésent dans le tableau périodique. Ils présentent des propriétés très sympathiques pour différentes applications (transport du courant (cuivre), étanchéification en cryogénie (indium), etc...). On va voir dans cette leçon les propriétés de structures et physico-chimiques des métaux.

I Cristaux métalliques

I.1 Propriétés physico-chimiques

Cf Dunod p654.

Manip qualitative : utiliser un fil de cuivre pour montrer ses propriétés.

- Optique : **opaque au rayonnement électromagnétique**, réfléchit la lumière,
- Mécanique : **ductile et maléable**, déformation sans rupture (cf indium dans l'étanchéité des cryostats), **tenace** : résiste aux déformations et compressions (plaqué de cuivre),
- Conduction : **conductivité électrique et thermique** très élevées
- Chimique : **bons réducteurs** ($E_{ionisation}$ faible) : forment des cations

I.2 Modèle microscopique

Modèle de Drude-Lorentz : les électrons forment un gaz parfait : les liaisons métalliques sont donc délocalisées = pas d'orientation particulière mais qui assurent la neutralité globale du cristal. Les cations sont fixes et forment un empilement compact de sphères dures. On parle du **modèle du cristal parfait** (voir Dunod PCSI p648) : ensemble de particules empilées tri périodiquement à l'infini et sans défaut dans l'espace.

Logiciel VESTA : struture cubique à faces centrées du cuivre groupe d'espace n°225.

II Structures cristallines

Logiciel VESTA : struture cubique à faces centrées du cuivre groupe d'espace n°225, parler de la maille cubique du cuivre.

II.1 Grandeur caractéristiques d'une maille

- Coordinence : nombre de premiers voisins d'un atome du cristal, noté N
- Population : nombre d'atomes présents dans une maille cristalline
- Compacité : $C = \frac{\text{Volume-occupé-par-les-atomes}}{\text{Volume-de-la-maille}}$

Transition : on va appliquer ces concepts en prenant l'exemple de la maille cubique à faces centrées du cuivre.

II.2 Structure cubique à faces centrées (cfc)

- Cfc : atomes aux noeuds de la maille et aux centres des faces. Principe de construction avec lempilement des plans de type ABC Dunod p667 [Montrer sur le logiciel VESTA](#),
- $N = 12$ (prendre un atome, compter le nombre de ses voisins), $Z = 4$ faire la démo au tableau,
- Volume de la maille : $V_{\text{maille}} = a^3$,
- conditions de tangence : $4r = a\sqrt{2}$ [Montrer sur le logiciel VESTA](#)
- Volume d'un atome : $V_{\text{atome}} = \frac{4\pi r^3}{3} = \frac{4\pi(a\sqrt{2})^3}{3 \times 4^3}$,
- Compacité : $C = \frac{N \times V_{\text{atome}}}{V_{\text{maille}}} = 0.74$ méthode à retenir,
- Masse volumique : $\rho_{Cu} = \frac{Zm_{Cu}}{a^3} = \frac{4M(Cu)}{N_A a^3}$, avec $a_{Cu}^{tab} = 362$ pm.

[Manip quantitative : mesure de la masse volumique du cuivre.](#) Mettre des copeaux de cuivre dans une fiole jaugée, bien peser et faire la tare sur la balance. Ajouter l'eau, agiter car il y a des bulles collées sur les copeaux. Remplir la fiole précisément. Peser et en déduire le volume d'eau ajouter. Déterminer le volume de cuivre. La masse volumique est $\rho_{Cu} = \frac{m_{Cu}}{V_{Cu}}$, à comparer avec 8.960 g.cm^{-3} .

II.3 Sites interstitiels

Présenter les sites octaédriques et les sites tétraédriques. Parler de rayon d'habitabilité cf Dunod p671.

Conclusion

Ouvrir sur les alliages : insertion et substitution. Très utilisé dans l'industrie car métaux pas si robustes que ça (ex : fer).

Ouvrir sur d'autres types de cristaux : ioniques (ex : NaCl, composés de ions de signes contraires, interactions coulombienne + principe d'excusion de Pauli), covalents (ex : graphite, diamant, liaisons covalentes entre les atomes (partage d'électrons pour stabiliser la configuration gaz noble)), moléculaires (ex : CO, H₂, N₂, glace, assemblés de molécules avec des liaisons de types VdW ou liaisons hydrogènes).